



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	硬化型復元力特性と慣性質量ダンパーを組み合わせた変位抑制型免震構造に関する研究〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	射場, 淳
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16347号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95033
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	IBA_Jun_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 射場 淳

学 位 論 文 題 名

硬化型復元力特性と慣性質量ダンパーを組み合わせた変位抑制型免震構造に関する研究
(Seismic Isolation System with Quasi-Zero Stiffness and Tuned Inerter Damper)

免震建物が普及して 30 年あまり、その耐震安全性は進歩を遂げるとともに大地震が起こることにより免震構造の有用性が証明されてきた。一方で、日本の免震構造の歴史に目を向けると、固有周期の長周期化への強い志向が存在する。長周期化するほど建物の応答加速度は低減できるが、一方で、応答変位は増大してしまうことに留意すべきである。長周期化の実現には低剛性の免震装置を使用すれば良く、従来は低剛性を安定的に実現できる装置開発に主眼が置かれてきた。このような状況の中、長周期構造物である免震建物が長周期地震動を受けると、共振現象を誘発し、免震層に設けられた免震クリアランスを超える応答が生じる可能性が指摘されている。実際に、2016 年に発生した熊本地震では内陸直下型地震に特有の長周期パルス性地震動によって、設計想定範囲を超えた免震建物が確認された。このような状況に鑑み、本論文の目的を「多様な地震動入力に対して所定のクリアランス範囲内に応答変位を抑えつつ、従来の免震建物と同等な応答加速度低減効果を有する次世代の高機能免震構造を提案し、その有効性を確認すること」として掲げる。本論文は全 5 章によって構成されており、以下に各章の概要を示す。

第 1 章は、研究背景・目的、提案システム、本研究に関する既往の研究、まとめによって構成される。研究背景では、免震構造が実際に巨大地震を経験することで潜在的に抱える問題点が浮き彫りとなり、近年予測される南海トラフ地震等では極限事象が指摘されるなど切迫した状況であることを概説し、問題点の抽出を行う。本研究で掲げた目的を達成すべく、提案システムはこれまでの「長周期化 + 高減衰付加」では上述の問題に対処できない現状を踏まえ、免震建物に硬化型復元力特性と慣性質量ダンパーの二つの要素を組み合わせた SQT(Seismic isolation with Quasi-zero stiffness and Tuned inerter damper) モデルとした。硬化型復元力特性とは、変位の 3 乗に依存した復元力を発揮する変位抑制機構である。これにより、中小地震時には従来の免震建物として機能させ、免震層の変位が過大になった場合には復元力を発揮させ応答変位を抑え込む。しかし、硬化型復元力特性を有することで非線形現象を誘発させ、振動制御対象物の応答を劣化させる可能性がある。そこで、慣性質量ダンパーとの組み合わせにより上述の問題の解決を行う。慣性質量ダンパーは慣性質量に直列にばねとダッシュポットを並列に繋いだ要素を結合させることで、対象物の振動制御を行う機構であり、任意の振動数の応答低減が期待できる。提案システムでは、硬化型復元力特性と慣性質量ダンパーを組み合わせて使用することで応答変位と応答加速度の低減を実現させる。

第 2 章では、従来の免震建物に硬化型復元力特性と慣性質量を備えた SQI(Seismic isolation with Quasi-zero stiffness and Inerter) モデルを扱う。SQI モデルは本論文の提案システム SQT モデルの試作モデルにあたり、SQT モデルでは「慣性質量ダンパー」を使用するのに対して SQI モデルでは「慣性質量」を用いる。第 2 章では、SQI モデルを理論・加振試験・解析の観点から分析することによって、第 3 章の SQT モデルの分析への足掛かりとする。本研究で扱うような硬化型復元力特性を備えた系では、特定の周波数で応答が急激に増減する跳躍現象が認められる。跳躍現象は応答特

性が急激に変化する可能性があるため、応答制御を行う上で跳躍現象が発生する振動数を特定することが重要である。そこで、SQI モデルの周波数応答特性を得ることにより、跳躍現象等の非線形現象の把握も含めた基本特性の把握を行った。はじめに、定常波加振時の運動方程式を立式し、そこから近似解法を用いて周波数応答曲線を導いた。また、それに付随して跳躍現象が発生する振動数を特定可能な代数方程式を求めた。続いて、理論式によって得られた周波数応答曲線を加振試験によって得られた周波数応答曲線と比較することで、理論式の妥当性を確認した。加振試験で使用した免震試験体は、免震クリアランスを実大のスケールで再現したもので、地震波加振による応答特性の把握も実施することで提案システムの有効性を確認した。最後に時刻歴応答解析から、加振試験結果と比較することで、時刻歴応答解析の妥当性を示した。

第3章では、SQT モデルを理論・加振試験・解析の観点から分析する。第2章で扱う SQI モデルの周波数応答曲線による解釈では、硬化型復元力特性を備えることで発生する非線形現象により応答変位・加速度が劣化する恐れがあった。また、慣性質量を免震層に直に挿入することは高振動成分の入力に対して応答加速度の劣化を誘発する。これらの問題点を改善すべく SQI モデルの「慣性質量」を SQT モデルでは「慣性質量ダンパー」に変更することで提案システムのロバスト性の向上を図った。主な研究手順は第2章と同様に、はじめに、運動方程式を立式し、そこから周波数応答曲線を得た。第3章では、慣性質量ダンパーのチューニング振動数を決定する設計式を提案し、周波数応答曲線を対象に従来の免震建物モデルと SQT モデルを比較することで有効性を確認した。その後、SQT モデルの試験体を作製し、理論式による周波数応答曲線と加振試験によって得られた周波数応答曲線を比較し、理論式の妥当性を示した。最後に時刻歴応答解析を実施し、加振試験結果と比較することで、時刻歴応答解析の妥当性を示し、一質点系の応答解析により SQT モデルの有効性を示した。

第4章では、SQT モデルを建物モデルとして再現し、多質点モデルを対象とした地震波加振を行い、従来の免震建物モデルとの応答を比較することで SQT モデルの有効性の確認を行った。解析に用いた免震建物モデルの免震システムは鉛プラグ入積層ゴムで構成し、免震層の擁壁衝突を考慮するための擁壁も再現した。入力地震動には標準波から短周期パルス、長周期パルス、長周期長時間地震動など特性の異なる地震波を用いた。解析結果より、従来の免震建物である S モデルでは擁壁衝突を引き起こす長周期地震動に対して SQT モデルは変位抑制の観点で有効であることが確認できた。また、慣性質量ダンパーを硬化型復元力特性と併用させることは応答加速度の低減に有効であった。中小地震を想定した入力には SQT モデルが従来の免震建物として機能し、擁壁衝突を引き起こすような巨大地震かつ長周期の地震動には擁壁との衝突を回避することができた。上述の SQT モデルの応答特性は中層モデルのみならず高層モデルにおいても確認できた。これらの解析結果から、SQT モデルが様々な特性を有する地震動に対して変位と加速度の観点から有効であることを明らかにした。

第5章「結論」では、本論文で得られた知見をまとめ、今後の展望について言及した。