

氏 名	潘 鵬
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2417 号
学位授与の日付	平成 16 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科 建築学専攻
学位論文題目	Safety and Functionality of Base-isolated Building Structures Subjected to Vertical Ground Motions (鉛直地震動を受ける免震建物の安全性と機能性)
論文調査委員	(主 査) 教授 中 島 正 愛 教授 井 上 一 朗 教授 竹 脇 出

論 文 内 容 の 要 旨

1995年兵庫県南部地震において露見した建物崩壊や機能喪失に対する反省にたつて、免震建物の建設は、特に病院など災害時拠点施設を中心に飛躍的に増えている。これは社会の免震に対する期待の証左であるが、免震は横揺れ（水平動）にはその効力を存分に発揮するものの、縦揺れ（上下動）に対しては免震効果を有していない。従来の耐震構造においては、水平動による応答が上下動による応答を遙かに凌ぐので、上下動による影響は副次的な因子と認識されてきたが、免震によって水平動による応答が激減する結果、相対的に上下動による応答が卓越する。ここにおいて、上下動を受ける免震建物の揺れを精度よく予測し、特に免震建物の機能性喪失に対する設計要件を明示することが重要となる。本論は、上下動を受ける免震建物の上下応答を精度よく予測する手法の構築をめざしたもので、以下の2点を論文の射程としている。

- ① 免震装置の特性、上部構造の特性、地震動の不確定性等を考慮したうえで、水平動に加えて上下動を被る免震建物の応答性状を、特に水平動だけを受ける場合の応答性状に比べてどれだけ変化するかという視点から考察するとともに、上下動による応答のなかでもとりわけ機能性喪失を支配する上部構造の上下床振動を適切に予測する手順を構築する。
- ② 上下動に伴う変動軸力と水平動による強制水平変形を受ける免震装置（積層ゴム支承）は複雑な復元力特性を有するが、この復元力特性を適切に反映した免震建物地震応答の評価と検証をめざし、上下動と水平動を同時に受ける免震建物の地震応答再現に適用しうるハイブリッド実験手法を開発する。

第1章では、本論文の目的、背景、関連研究、論文の構成を示している。

第2章では、1983年以来20年にわたって造られてきた免震建物を対象に、設計規範、免震装置、地震動評価、建物規模等、設計・施工に関わる変遷を、膨大な技術資料を整理することから分析している。免震建物の建設実績を踏まえた自信が、より大規模で高層の建物への適用、より柔らかい免震装置の導入、それに伴う上部構造応答の軽減を促している事実を明示するとともに、免震建物の設計における問題点を、上下動に伴う機能性喪失に対する研究・技術資料の欠落、過大地震下における免震建物の擁壁との衝突可能性への配慮の欠如と同定した。

第3章、第4章では、鋼構造建物に対する免震を対象に、建物規模、強震動の性質を主たる変数とし、水平動と上下動を同時に被る免震建物の応答性状を、免震装置への最大水平変形、免震装置への変動軸力、上部構造の最大層間変形、上部構造の上下床振動を主たる指標として考察している。積層ゴム支承の水平復元力特性が、水平動に伴う転倒モーメントと上下動による変動軸力に影響される事実に着目し、変動軸力と水平変形を変数とした新しい積層ゴム支承復元力モデルを提案し、このモデルを組み入れた有限要素法解析を用いて所定の情報を獲得した。一連の考察の結果、免震装置の最大水平変形に及ぼす上下動の影響は無視できること、免震装置への変動軸力は、水平動だけを受ける場合の転倒モーメントに伴う変動軸力と、上下動だけによって作用する変動軸力の二乗和平方根として予測できること、上部構造の最大層間変形に及ぼす上下動の影響は無視できること、床上下振動はほぼ上下動応答に支配されることを明らかにした。

第5章では、上下動による床上下振動を解析的に推定する手順を提案している。床上下振動は、柱の伸縮による揺れと柱

に接続される梁の揺れが重畳して生じることに着目し、柱の伸縮は柱の軸剛性を参照したバネで、また梁の揺れは柱梁節点から垂れ下がるバネでそれぞれ代表された「上下動一般化縮約モデル」を構築した。このモデルの妥当性を、さまざまな規模（上部構造層数、スパン数）と多数の地震動を受ける免震建物に対する数値解析結果と照合することによって検証した。

第6章、第7章は、上下動と水平動を同時に受ける免震建物の地震応答再現に適用しうるハイブリッド実験手法の開発に関わる内容である。免震建物では、上部構造はほぼ弾性的に応答するが、積層ゴム支承等から構成される免震層は複雑な履歴特性を有することを踏まえ、免震装置の履歴特性は実際の載荷実験から求め、上部構造は数値モデル化したうえで免震建物全体の地震時応答を再現する、サブストラクチャ法を用いたハイブリッド実験法を構築した。第6章では、免震装置がもつ水平復元力特性の面圧依存性を忠実に追跡しながら実験を進める荷重一変位混合制御型実験手法を新たに提案し、その手法の妥当性を一連の検証実験から明らかにした。また第7章では、この実験法を、インターネットを利用して実験と解析を複数の研究機関で協調しながら同時に実施するという、分散型ハイブリッド実験にも拡張し、その実効性を検証実験によって証明した。

第8章は結論であり、本論文から得られた成果を、各章毎に得られた知見としてまとめている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、1995年兵庫県南部地震において露見した建物崩壊や機能喪失に対する反省にたつて、その建設が加速的に増えている免震建物の地震時応答と耐震設計を主題に、特に免震建物の機能性確保に大きな影響を及ぼす上下動を取りあげ、免震建物の上下応答を精度よく予測する手法の構築をめざした内容で、得られた主な研究成果は以下の通りである。

- 1) 免震装置の水平復元力特性が有する面圧（軸方向力）依存性を反映した免震装置復元力モデルを構築し、このモデルを有限要素法骨組解析に組み込むことにより、免震建物の上下動応答を精度よく予測できる数値モデルを開発した。また、このモデルと過去十年間に記録された強震動群を用いた一連の解析から、上下動応答、とりわけ機能性に直結する梁上下方向加速度応答について、従来の耐震建物と免震建物との相違を明らかにした。
- 2) 上下動応答が、柱の伸縮による揺れと柱に接続される梁の揺れが重畳して生じることに着目し、柱の伸縮は柱の軸剛性を参照したバネで、また梁の揺れは柱梁節点から垂れ下がるバネでそれぞれ代表された「上下動一般化縮約モデル」を構築し、このモデルが、多層多スパン骨組の上下動応答とりわけ梁上下方向加速度応答を、少ない自由度で精度よく追跡しうることを実証した。
- 3) 免震建物では上部構造はほぼ弾性的に応答するが、積層ゴム支承等から構成される免震層の多くは複雑な履歴特性を有する。このような複雑な特性を一部にもつ免震建物に対する地震時応答予測の高度化をめざし、免震装置の履歴特性は実際の載荷実験から求め、上部構造は数値モデル化したうえで免震建物全体の地震時応答を再現するハイブリッド実験法を構築した。特に、免震装置がもつ水平復元力特性の面圧依存性を忠実に追跡しながら実験を進める荷重一変位混合制御型実験手法を新たに提案し、その手法の妥当性を一連の検証実験から明らかにした。またこの実験法を、インターネットを利用して実験と解析を複数の研究機関で協調しながら同時に実施するという、分散型ハイブリッド実験にも拡張した。

以上、本論文は、免震建物の耐震性能とりわけ機能性保持能力に直結する上下動応答について、その応答性状を従来の耐震建物との対比において明らかにするとともに、その予測法の高精度化について新しい手法を提案した内容であり、建築耐震工学の発展にとって、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年8月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。