

## 論文審査の結果の要旨

氏名：扇 谷 匠 己

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：免震部材の降伏を許容した超高層免震建築物の耐風性能に関する研究

審査委員：（主査） 教授 北 嶋 圭 二

（副査） 教授 福 井 剛 教授 秦 一 平

名誉教授 安 達 洋

本論文は、風荷重により免震部材が降伏した際の弾塑性挙動下での超高層免震建築物の耐風性能についてまとめたものである。一般的な免震構造は、建物の最下部の免震層に、水平剛性の極端に低い免震支承材（積層ゴム等）と、地震入力エネルギーを吸収し免震層の変形を抑制する免震部材（弾塑性ダンパー等）を設置することにより、地震時の上部構造への入力エネルギーを低減させることで耐震性能を向上させることを目的に開発・実用化されたものである。このような免震構造の耐震性能に関する研究事例や適用事例は数多く存在する。しかし近年、100mを超える超高層建築物に対しても免震構造を採用する事例が増えてきており、風荷重の増大に伴い風荷重の影響が無視できない状況となっている。これは、超高層免震建築の場合には、耐震性能の向上という観点で設定される免震部材の降伏せん断力に対し風荷重が拮抗し、風荷重により免震部材が降伏してしまう恐れがあるためである。

現在、免震構造における耐風設計に関する指針としては、「免震建築物の耐風設計指針」（以下、JSSI指針）が2012年に日本免震構造協会（JSSI）から発刊されている。そこでは、風荷重の変動成分に対して免震部材は降伏しないほうが望ましいとされている。これは免震部材が降伏した際の弾塑性挙動下での耐風性能に関する研究事例が非常に少なく、十分な知見が得られていないためである。しかし、風荷重が増大する超高層免震建築物において、風荷重に対して免震部材を弾性範囲に収めようとすると耐震性能の低下が懸念されるため、風荷重に対して免震部材が降伏した際の弾塑性挙動下での耐風性能に関する研究成果の蓄積が重要性であると指摘されている。

このような背景のもと、本論文は、風荷重により免震部材が降伏した際の超高層免震建築物の耐風性能について検討することを目的としたものである。申請者は本論文において、風荷重に対して免震部材の降伏を許容した際の課題や問題点を整理し明確にするとともに、その中で特に研究事例が少ない“風向変化が風応答に及ぼす影響”と、“風直交方向の空力不安定振動”について着目し、独自の実験方法を用いて詳細な検討を行い、非常に有益な知見を与えている。また、超高層免震建物において相反関係にある耐震性能と耐風性能について、確率的な観点から同じ指標で評価することを試み、両性能がバランスよく確保できる設計方法の展望についても貴重な知見を与えている。

本論文は、全6章で構成されている。以下に各章の内容とその評価について述べる。

第1章「序論」では、研究の背景と本研究の目的および構成について示している。地震大国である日本では、人命の保護が第一の目的として構造設計が行われてきたことや、現在の社会情勢に触れ、免震構造の有効性や超高層免震建築物の留意点、耐風性能を検討する必要性についてまとめており、本研究で着目した“風向変化が風応答に及ぼす影響”と“風直交方向の空力不安定振動”の位置付けを明確にしている。

第2章「免震建築物の耐風性能に関する既往の研究」では、低層から超高層に至る免震建築物の耐風安全性、建築物の弾塑性風応答、免震建築物の空力不安定振動、耐震性能と耐風性能の相反性に関する既往の研究についてまとめており、免震部材が降伏した際の弾塑性挙動下での耐風性能に関する研究事例が非常に少ないことを確認し、本研究の重要性を明確にしている。

第3章「風向変化が風応答に与える影響に関する検討」では、風向・風速変化を考慮した風力波形

の作成方法について示すとともに、作成した風力波形を用いた風応答解析結果について検討している。既往の研究では、建物模型の設置角度を段階的に変え、その都度実施した風洞実験結果を断続的に繋げることで風向変化を考慮した断続的な風力波形を作成しているのに対し、本研究では、風洞実験中にターンテーブルを回転させるという独自の方法により連続的に風向変化する風力波形を作成している点に特長がある。また、風洞実験での時間軸を実時間に変換する相似則を変えることで風速変化も考慮できることを示し、これまで未確立であった時刻歴風応答解析で用いる風向・風速変化を考慮した風力波形の作成方法を提示していることは、大いに評価に値する。風向・風速変化の影響が最大応答値に及ぼす影響はさほど顕著ではないであろうことはある程度予想できるが、これまで確認されていなかった結果を確認したことや、また最大値のみではなく、時々刻々変化する免震部材の挙動を検討する上で、連続的な風力波形の作成が必要であるという点で、本章の成果は評価に値する。

第4章「風直交方向を対象とした空力不安定振動の検討」では、免震建築物の空力不安定振動の発生の有無をハイブリッド式実験法により検討した結果について示している。免震部材が降伏し、超高層免震建築物の固有周期がより長周期化すると、風直交方向の空力不安定振動が発生するのではないかという懸念が生じるが、弾塑性挙動下での空力不安定振動に関する研究はほとんど実施されていない。これは空力不安定振動の検討を行うためには、建築物に作用する風圧力と風応答の相互作用が再現可能な風洞実験システムが必要となること、さらに免震部材が降伏する場合、弾塑性挙動する建築物の応答を再現できる風洞模型が必要となることにより、実験の難易度が非常に高くなるためである。本研究では、風洞実験と数値解析を組み合わせた独自のハイブリッド実験法（スウェーローッキング・ハイブリッド実験法：S-R.Hシステム）を提案し、超高層免震建築物の空力不安定振動について検討している点に極めて高い独創性がある。検討の結果、限られた検討ケースではあるが、弾性周期が長周期の場合には空力不安定振動が発生するが、塑性化に伴って固有周期が長周期化した場合には固有周期の変動や免震部材のエネルギー吸収により空力不安定振動が発生しなかったという、非常に貴重で重要な知見を得ている。

第5章「耐震性能と耐風性能の相反関係を評価可能な指標に関する一考察」では、超高層免震建築物の耐震性能と耐風性能の相反関係に対して、両性能を同一の条件下で評価可能な指標について考察している。設計クライテリアの設定方法や外力の大きな等、今後の検討課題となる項目もあるが、確率的な観点から「超過確率」という統一的な指標を用いることにより、免震構造において相反関係にある耐震性能と耐風性能について、両性能をバランスよく確保できる設計方法の展望について示している点は、今後の免震構造の耐震・耐風設計法に関して有益な知見を与えている。

第6章では、「結論」として各章の要点を改めてまとめるとともに、論文全体を通じて得られた知見について総括している。

以上、本論文は風荷重により免震部材が降伏した際の弾塑性挙動下での超高層免震建築物の耐風性能について、貴重かつ重要な多くの知見を与えたものと認められる。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以上

令和2年2月20日