

論文の内容の要旨

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

本論文は、超高層免震建築物を対象として、風荷重により免震部材が降伏した際の耐風性能について研究したものである。免震構造は、阪神・淡路大震災において有効性が実証されたことを契機に増加した。現在では、戸建住宅のような低層建築物から、100mを超える超高層建築物にまで免震構造が採用されている。一般的に免震構造は、大地震時に高い耐震性能を発揮することが求められるため、耐震性能の向上を目的とした研究が多く、耐風性能に関する研究は比較的少ないのが現状である。世界でも有数の地震大国である日本では、建築物は地震に対する安全性を確保することが常に求められてきた。「耐震」設計法では、大地震時に建築物の崩壊を防ぐため、部材レベルでの降伏は許容している。すなわち部分的に「壊れる」ことを許容しており、大地震時には、「人の安全」は確保するが、「資産の保全」までは担保していない。しかしながら近年では、資産価値の保全を求められることが多くなり、大地震時においても主要構造部材のみならず非構造部材に対しても損傷を出来るだけ少なくすることが求められるようになってきた。また、事業継続計画（BCP）を検討する上で、建築物の継続利用が必要不可欠となってきており、「人の安全」のみならず「資産の保全」も要求性能として求められるようになってきた。

一般的な免震構造として、免震層を建物最下層に設ける基礎免震構造と中間部に設ける中間階免震構造がある。その特徴は、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ている点にある。基礎免震構造であれば上部構造と地盤との分離を図り、地震による上部構造への入力エネルギーを低減させている。基礎免震構造の場合、免震効果を十分に発揮するためには基礎固定時の1次固有周期に対して、免震周期を2~3倍程度とする必要がある。そのため、超高層建築物を効果的に免震化するためには、免震周期を4~6秒と長周期化しなければならない。免震周期を長周期化するには、免震部材の降伏せん断力を小さくするなどして免震層のせん断力係数を小さくする必要がある。しかしながら、超高層免震建築物のように建物高さが高くなると風荷重が増大し、風荷重によるせん断力係数が大きくなるため、むやみにせん断力係数を小さくすることが出来なくなる。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。さらに、2012年に日本免震構造協会(JSSI)から発刊された「免震建築物の耐風設計指針」では、『「設計用風荷重が小さい」は「対風性能の評価を省略する」理由の一つではあるが全てにはならない。』と記載されている。これは、風外乱が地震外乱とでは応答に与える影響に異なる特徴を有しているため、単に荷重の大小だけで評価することが出来ないことを示している。例えば、風外乱は台風为代表されるように継続時間が地震外乱に比べて長い場合、荷重レベルが小さくても繰り返しによる部材の疲労損傷等が懸念されることがある。さらに、地震荷重と風荷重の相反する関係に注意しなければならない。例えば、外乱の卓越する周期が、一般的に地震外乱は超高層建築物の固有周期より短い領域にあるのに対し、風外乱は長い領域にある。そのため、超高層建築物や免震建築物のように固有周期が長い建築物は、地震の卓越周期から外れるため地震荷重は小さくなる傾向にある。その反面、風外乱の卓越周期に近づいてしまうため風荷重が増大してしまう恐れがある。このように、超高層免震建築物の設計においては、地震荷重のみならず風荷重についても考慮する必要がある。また近年では、気候変動などの影響により勢力の強い台風が発生しており、今後、設計風速を上回る強風が発生する可能性もある。

そこで本研究では、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ている。検討する耐風性能として、①風向変化が風応答に及ぼす影響、②風直交方向の空力不安定振動の2項目を対象とする。さらに、将来的な展望として、耐震性能と耐風性能の相反関係を評価可能な新たな指標について、「超過確率」を用いた応答評価について考察している。以上の内容について、本論文は、全6章で構成されている。以下に各章の内容について述べる。

第1章「序論」では、研究の背景として、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述べ、本研究の目的および構成について示している。

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、地震と風の相反性に関する既往の研究についてまとめている。

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述べるとともに、作成した風力波形を用いた風応答解析結果について示している。一般的な風応答解析では風向や風速の変化は考慮せず、継続時間10分間の風力波形により風応答を評価している。しかしながら、強風の発生イベントの1つである台風では、時々刻々と風速や風向が変化し、作用時間も4時間程度と長時間となることがある。そこで、台風を模擬した時刻歴風力波形を作成する方法について示している。風向変化については実験時にターンテーブルを回転させることで再現し、風速変化は相似則の関係を利用して時間刻みを変えることで再現している。また、作成した風力波形を用いた時刻歴応答解析を実施し、従来の風外力（風向・風速一定、評価時間10分）を用いた時刻歴応答解析との比較結果について述べている。その結果、風向変化が最大応答を著しく増大させる要因とはならないことが確認できた。

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、免震建築物を対象に、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。超高層免震建築物は、一般建築物に比べて固有周期が長いのが特徴の一つであり、免震部材が塑性化するとより一層長周期化する。そのため、一般建築物では空力不安定振動が発生しない規模の建築物でも免震構造を適用することで空力不安定振動が発生する可能性が高まる。空力不安定振動の発生は、建築物の倒壊にもつながる可能性があり、耐風設計において空力不安定振動を発生させないことは極めて重要となる。そこで、免震建築物の空力不安定振動の検討方法として、スウェイ・ロッキング振動を再現可能なシステム（以下、S-R.H）の概要を、システムに適用可能な数値積分法を含めて示している。また、S-R.Hを用いて、超高層免震建築物の空力不安定振動について検討した結果について述べている。その結果、S-R.Hが空力不安定振動を再現可能であることを示した。さらに、本研究で対象とした超高層免震建築物に関して、免震部材が塑性化し長周期化しても空力不安定振動は発生しないことを確認した。

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、1章でも述べているような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、将来的な展望として位置付け、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。指標として本研究では、確率的な視点から「超過確率」を用いることとし、相反関係にある事象の応答評価を試みた。超過確率は、モンテカルロシミュレーションにより既知となる外力の確率分布から地震応答と風応答の確率分布を導出し、設定したクライテリアに対して算出している。その結果、超過確率という指標を用いることで、耐震性能と耐風性能の相反関係を評価可能であることを示した。また、超過確率による免震層の設計例を示すことで指標の有効性を示した。

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。

本論文では、超高層免震建築物を対象に、風荷重により免震部材が降伏した際の耐風性能について検討し、その結果について示した。対象とした項目は、研究事例が非常に少ない事象として、風向変化が応答に及ぼす影響と空力不安定振動の発生に着目し、具体的な検討方法について示すとともにその検討結果についても示した。本研究により、免震部材が弾塑性挙動した際の耐風性能について、限定的な条件下ではあるものの一定の結論を示すことができた。また、将来的な展望として、耐震性能と耐風性能のように相反関係がある事象を評価する指標として、確率的な視点から「超過確率」を用いることで、相反性を考慮した応答評価が可能であることを示した。