

氏名（本籍） やま うち とよ ひて 山 内 豊 英（大阪府）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第 982 号
学位授与の日付 2018 年 3 月 19 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目 地盤との連成振動を考慮した杭頭免震構造の
応答評価法の提案

論文審査委員 （主査）嘱託教授 北村 春幸
教授 衣笠 秀行 教授 永野 正行
教授 東平 光生 教授 塚本 良道

論文内容の要旨

1983 年に我が国で初めての免震構造物「八千代台住宅」が建設されて以来、これまでの約 30 年余りの間に免震構造の普及は飛躍的に拡大した。1995 年の兵庫県南部地震や 2011 年の東北地方太平洋沖地震において免震構造の地震低減効果が実証されたこともあり、2015 年末時点の戸建住宅を除いた免震建物総数は約 4,000 棟を数える。

免震構造の普及拡大に伴い、免震構造に対するニーズも多様化している。まず、高さ 60m を超える超高層建物に対する免震構造の適用が挙げられる。兵庫県南部地震以降の急激な普及拡大に伴い、免震構造の適用性を模索する精力的な研究が行われ、固有周期が長い超高層建物でも免震構造が有効であることがわかった。超高層建物への免震構造の適用と並行し、高面圧、長周期、転倒モーメントの増大に伴う引抜き力等に対応できる免震部材の開発も進められた。このような設計技術と免震部材の高度化は結果として上部構造の合理化と空間の有効利用にも繋がることとなり、超高層免震構造は構造安全性と合理性のバランスがとれた構造形式として展開されている。

免震構造の多様化のもう一つの方向として大平面中低層建物への適用が挙げられる。本来、固有周期の短い中低層建物は免震構造が適した構造物と言えるが、超高層免震建物ほどに上部構造の合理化が見込めないため、特に大平面となった場合には構造安全性と合理性のバランスをとるのが困難となる。そこで、近年、実物件で数多く採用されているのが杭頭免震構造である。杭頭免震構造は、積層ゴム等の免震装置を直接杭頭に設置して杭を連結する基礎梁やマットスラブなど（以下、連結部材と称す）を軽微化し、地下工事の大幅な合理化を可能とする工法であり、大平面建物を免震構造とする場合の建設コストの削

減効果は莫大な規模となる。特に、大平面中低層建物として代表的な物流施設では、東北地方太平洋沖地震で甚大な被害を受けたこと、並びに、荷崩れ防止やBCP対策等の観点から免震化へのニーズが拡大しており、2011年以降、杭頭免震構造の採用数が増加している。

一方、杭頭免震構造は、従来の基礎免震構造では剛強としていた積層ゴム下部の梁を軽微化するため、杭頭の曲げ回転変形の拘束効果が低くなる。従って、杭頭免震構造では、特に軟弱地盤の場合に杭頭の曲げ回転変形が生じ易いこと、また、それに起因して積層ゴムも曲げ回転変形し性能が変化する可能性があることは容易に推測できる。

実際、既往研究において、積層ゴムの端部に曲げ回転変形が生じた場合に鉛直荷重の水平分力が積層ゴムへの付加せん断力として作用し、見かけ上の水平剛性が低下することが指摘されている。また、積層ゴムの下端に曲げ回転変形が生じると、従来の基礎免震では積層ゴムの中央高さとなる反曲点が下方に移動し、積層ゴムのせん断力による曲げモーメントの上下部材への分配率が変化することも指摘されている。このような力学特性の変化を考慮できる積層ゴムの解析モデルが既往研究により幾つか提案されているが、使用には高度な専門知識が必要であり、汎用の解析プログラムにも導入困難な場合が多い。

従って、現状の設計では、杭頭の曲げ回転角が0.01rad以内であれば積層ゴムの力学特性に及ぼす影響は少ないとする工学的知見に基づき、杭頭の最大曲げ回転角を設計クライテリアとして設定するのみで積層ゴムの力学特性変化を無視することが多い。しかし、実験結果によっては回転角が0.01radでも水平剛性が10%程度低下しているものも見られ、力学特性への影響は決して無視できるものではないと考える。

また、積層ゴムの反曲点移動に関して、現状の設計では、解析モデルの免震層部分に積層ゴムを表す曲げ回転ばねを設けて反曲点移動を表現する事例が見られる。しかし、強い非線形性を有する積層ゴムの曲げ回転ばねを汎用の解析プログラムでモデル化するのは困難であり、反曲点移動が適正に表現できていない事例が多いものと推測される。

このように、杭頭免震構造の合理性だけが注目され、幾つかの課題の影響が不明確なままに実用化が進んでおり、杭頭免震構造が正しく普及拡大されるためには、それらの影響を明示して現状の設計用解析モデルおよび設計法を見直す必要がある。

一方、上記の課題の影響を明らかにするため、端部の曲げ回転変形の影響を考慮できる積層ゴムモデルを使用し、杭頭免震構造における積層ゴム力学特性の一般化を試みた既往研究がある。それらの研究においては、杭頭免震建物を対象として地盤-杭-連結部材-積層ゴムで構成される下部構造の架構モデルを構築し、解析変動因子の組合せ条件に応じた積層ゴムの力学特性について整理し、積層ゴムの剛性評価式を提案した研究もある。

それらの既往研究により杭頭免震構造の構造特性に関する多くの知見が得られているものの、いずれの研究も上部構造からの慣性力のみを外力とした静的解析による検討であるところに課題が残されている。地震による動的な外乱下では、静的解析のように積層ゴムの水平変形に応じて曲げ回転変形が単調に増加するとは考え難い。更に、地震による外力は上部構造からの慣性力だけでなく地盤震動に伴う強制変形の影響も大きいと考える。

本研究では、杭頭免震構造を対象として積層ゴムの曲げ回転変形や建物と地盤の動的相互作用を考慮できる連成振動解析モデルを構築し、地震応答解析によるパラメトリック・

スタディを行い、動的挙動や地盤震動を考慮した形で種々の構造特性を定量的に評価する。また、現状を想定した設計用解析モデルや既往研究の方法でも同様の解析検討を行い、杭頭免震構造における課題が構造特性に与える影響を定量化して明示する。更に、杭頭免震構造の構造特性を評価する上で最も重要な積層ゴムの力学特性について、動的挙動を考慮した積層ゴムの力学特性評価法を提案するとともに、杭頭免震構造の杭基礎を対象とした汎用的な設計用解析モデルと応力評価法を提案する。

本論文は、全6章で構成し、1章序論では、研究の背景、杭頭免震構造に関する既往研究と本研究の位置付け、研究の目的を述べ、本論文の構成を示している。

2章では、杭頭免震構造の動的構造特性を評価するために構築した上部構造-免震層-基礎梁-杭-地盤の連成振動解析モデルについて述べている。連成振動解析モデルは物流施設の1スパンを対象とした魚骨型モデルとして構成している。杭頭の曲げ回転変形に伴う力学特性変化を考慮できる積層ゴムモデルを組み込むとともに、Penzien型モデルとすることで地盤と建物の動的相互作用も考慮可能とした。本章では、連成振動解析モデルの諸元詳細やモデル化方法、並びに、積層ゴムモデルに関する既往研究の変遷と本研究で使用する積層ゴムモデルの詳細について述べている。

3章では、杭頭免震構造における種々の構造特性を定量的に評価した結果を示している。まず、連成振動解析モデルと現状を想定した基礎固定の設計用解析モデルのそれぞれで上部構造の応答特性を定量的に評価し、軟弱地盤では現状解析モデルの方が応答を過大に評価する一方で、RC杭のように剛性の高い杭を使用した場合には連成振動解析モデルの応答が現状解析モデルよりも大きくなる場合があることを示している。後者の現象は、杭頭の拘束効果が低いことに起因して杭が曲げ変形せずに振動することが原因となっており、杭頭免震構造特有の現象と言える。次に、積層ゴムの力学特性として等価水平剛性と反曲点移動に伴う曲げモーメント分配に着目し、連成振動解析モデルにより動的挙動を考慮した形でそれらの力学特性値を定量的に評価している。これについては、既往研究で行われている慣性力のみを外力とした静的解析でも同様の定量的評価を行い、それぞれの評価値に差異があることを示している。続いて、設計適用範囲を明確にすることを目的とし、中間層免震構造で指摘されるモード連成作用と呼ばれる上部構造の応答増幅現象について検討を行い、杭頭免震構造において同現象が上部構造の応答に与える影響は小さく設計上の問題は生じないことを示している。

4章では、動的挙動を考慮した積層ゴムの力学特性評価法を提案している。まず、3章で定量的評価を行った積層ゴムの力学特性について、連成振動解析モデルによる評価と既往研究の静的解析による評価が異なる原因について考察し、地盤震動が積層ゴムの力学特性に影響を与えること、下部構造の特性に応じてその影響度合いが異なることを示し、動的挙動や地盤震動を考慮することの重要性を述べている。また、定量化された積層ゴムの力学特性値が、積層ゴムの曲げ回転剛性 K_{rp} を下部構造の回転剛性 K_B で除した回転剛性比 K_{rp}/K_B を用いた線形近似式で表せることを示し、積層ゴムの力学特性評価法として提案している。

5章では、杭頭免震構造の杭基礎を対象とした設計用解析モデルと応答変位法への適用

法を提案している。まず、杭基礎の応力分布について、連成振動解析モデルによる評価と、現状を想定した設計用解析モデルによる応答変位法の評価との比較を示し、主に杭頭部付近において両者の曲げモーメントに不整合があることを示している。また、その不整合の原因が、現状解析モデルの積層ゴムの曲げ回転ばね設定方法や杭頭拘束の低さに起因していることを示し、4章で示した積層ゴムの曲げモーメント分配率や杭頭免震構造特有の現象をモデル化した汎用的な設計用解析モデルと応答変位法への適用法を提案している。更に、提案した方法による評価の適用性についても定量的に評価し、その優位性についても示している。

6章では、本論文の結論として、本研究で得られた成果について総括的に述べるとともに、杭頭免震構造に関する今後の課題について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文では、高耐震化と経済性から多くの大規模物流倉庫で適用されている杭頭免震構造の応答挙動を適切に評価できる連成振動解析モデルを構築し、強い非線形挙動を有する積層ゴムの曲げ回転剛性の簡易評価法を提案し、現状の杭設計で採用されている応答変位法への適用方法を提示する、地盤との連成振動を考慮した杭頭免震構造の応答評価法の提案について審査を行った。

1980年代前半から建設されるようになった免震建物も、1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震を契機に普及拡大が進んだ。免震構造の普及拡大に伴い免震構造に対するニーズも多様化し、高耐震化へのニーズに対応してこれまで適用をあきらめていた様々な用途や規模の建物に免震構造が適用されるようになった。その一つとして大規模物流倉庫では、東北地方太平洋沖地震で荷崩れや移動・転倒により収容物が甚大な被害を受けたことから、2011年以降、免震構造の採用が増えている。

杭頭免震構造は、積層ゴムを直接杭頭部に設置して、積層ゴムの大変形により発生する応力を杭に負担させ、積層ゴムや杭の位置保持に限定することで基礎梁や基礎スラブの小断面化を図り、免震層の大幅な合理化を図る新しい工法である。大規模物流倉庫は、積載荷重が大きく4,5階建て以下の中低層建物がほとんどで、上部構造の合理化が見込めないため、杭頭免震構造の適用により高耐震化とコスト削減を実現している。

既往研究において、杭頭免震構造の課題として、軟弱地盤では地震動により杭頭と積層ゴムに大きな曲げ回転変形が生じ、積層ゴムの水平剛性と減衰性能が低下する。曲げ回転変形により積層ゴムの中央高さにある反曲点が下方に移動し、積層ゴムのせん断力による曲げモーメントの上下の取付け部材への分配率が変化することが指摘されている。現状の設計では、杭頭の曲げ回転角が 0.01rad 以内であれば積層ゴムの力学特性に及ぼす影響は少ないとする工学的知見に基づき、杭頭の最大曲げ回転角を設計クライテリアとして設定するのみでその影響を無視することが多い。強い非線形性を有する積層ゴ

ムの曲げ回転ばねを適切にモデル化するのは困難であり、反曲点移動が適正に評価できていないなどの課題が残されている。このように、杭頭免震構造の経済性のみが注目され、幾つかの課題を解決しないままに実用化が進んでおり、杭頭免震構造の課題の解決と現状の解析手法や検証法を見直す必要がある。

本論文は、杭頭免震構造を対象に曲げ回転変形を考慮した積層ゴムモデルを組込んだ詳細な地盤・杭・基礎梁・積層ゴム・上部構造連成振動解析モデルを構築し、数多くの地震応答解析を実施して、杭頭免震構造の応答性状を評価している。それらの検討から杭頭免震構造の現状設計における課題を明らかにし、汎用解析ソフトに適用できる積層ゴムの簡略モデルを提案し、曲げ回転変形を考慮した積層ゴムの応答評価法を示している。

本論文は、6章で構成し、1章序論では、研究の背景と研究の目的を述べている。

2章では、杭頭免震構造の応答特性を評価するための、詳細な地盤・杭・基礎梁・積層ゴム・上部構造連成振動解析モデルを構築している。上部構造は1スパンを対象とした魚骨型モデルを、地盤・杭・上部構造はPenzien型モデルを、積層ゴムは既往研究に基づき曲げ回転変形を考慮した三山モデルをそれぞれ採用している。

3章では、2章で構築した詳細な連成振動解析モデルを用いた数多くの地震応答解析を行い、杭頭免震構造の応答特性を評価している。現状設計で行われている表層地盤応答解析で求めた地表面波形を、免震層下部基礎固定モデルに入力する応答解析結果との比較により、積層ゴムの等価水平剛性と反曲点移動に伴う曲げモーメント分配の差異を明らかにしている。さらに、積層ゴムの水平剛性と曲げ回転剛性（以後、曲げ回転剛性等と略す）の非線形挙動を評価している。

4章では、動的挙動を考慮した簡易な積層ゴムの曲げ回転剛性等の評価法を提案している。3章で得られた非線形挙動を示す積層ゴムの曲げ回転剛性等を、積層ゴムの曲げ回転剛性 K_{rp} を下部構造の回転剛性 K_B で除した回転剛性比 K_{rp}/K_B を用いた線形近似式で表わす簡易評価法を提案している。

5章では、杭頭免震構造の杭基礎を設計するための静的解析モデルと応答変位法への適用法を提案している。連成振動解析モデルによる応答解析結果と現状設計で用いられる応答変位法による応力分布を比較し、それらの検討から4章の簡易評価法を適用した積層ゴムモデルを用いた応答変位法を提案し、その適用性について評価している。

最後に、第6章では、本論文の結論を述べている。

本論文は、杭頭免震構造の応答挙動を適切に評価できる地盤・杭・基礎梁・積層ゴム・上部構造連成振動解析モデルを構築し、現状設計で工学的判断の元に無視されてきた応答性状を明らかにしている。さらに、数多くの応答解析結果から、積層ゴムの曲げ回転剛性等の簡易評価法を提案し、現状の杭設計で採用されている応答変位法への適用を考案している。物流倉庫で適用事例の多い杭頭免震構造の耐震設計において、必要な検討項目を明らかにするとともに、汎用解析プログラムを使って適正な評価が可能となる評価手法を提案するものであり、免震構造の耐震設計に対する貢献度は極めて高いものである。

よって、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る。