

2. 博士論文：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

Proposal of Response Evaluation Method for Pile Top Seismic Isolation Structure
Considering Dynamic Soil-Structure Interaction

山内 豊英^{*1}

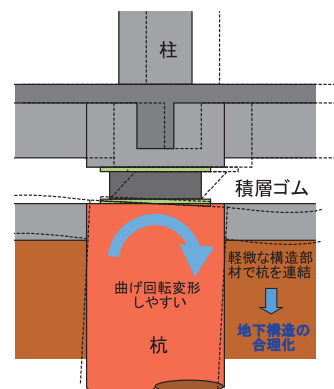
□ 目的

近年、大平面の中低層建物において杭頭免震構造が数多く採用されている。杭頭免震構造は、図－1に示すように、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部材を軽微化し、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、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。

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。

一方、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ついても、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が、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。



図－1 杭頭免震構造の概念図

本研究は、積層ゴムの力学特性変化や地盤との連成振動を考慮して杭頭免震構造の動的構造特性を明らかにし、設計に利用できる汎用的な応答評価法を提案することを目的とする。

□ 概要

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。

□ 結論

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図－2に示す上部構造-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。

3章では、杭頭免震構造の上部構造の応答特性や積層ゴムの力学特性等を定量的に評価した結果を示している。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。

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。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、図-3に示すように、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図-4のような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、本論文の総括的な結論と今後の課題について述べている。

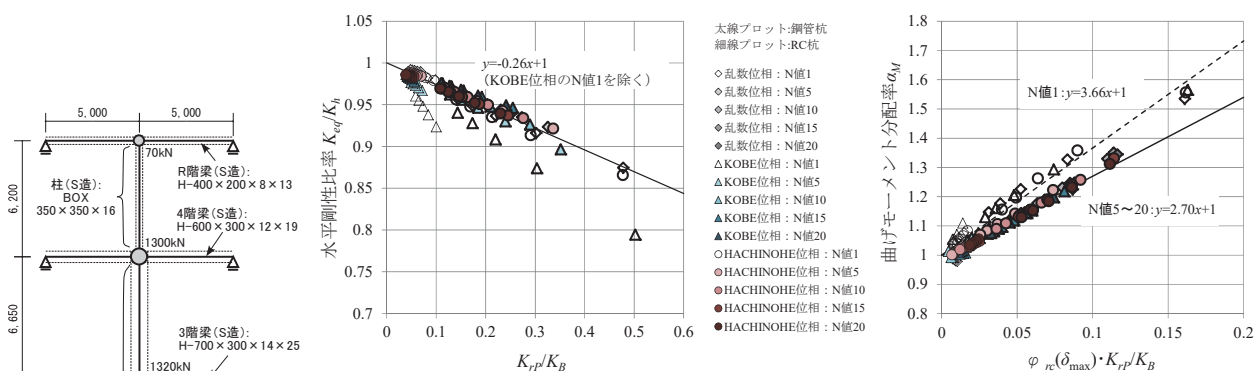


図-3 積層ゴムの力学特性と回転剛性比の関係（左：水平剛性比、右：曲げモーメント分配率）

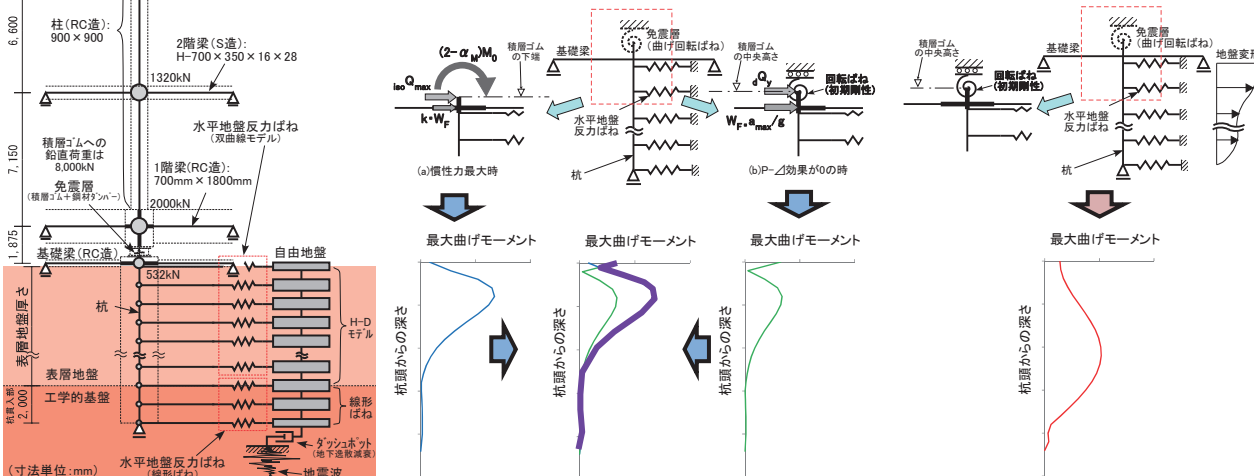


図-2 連成振動解析モデル

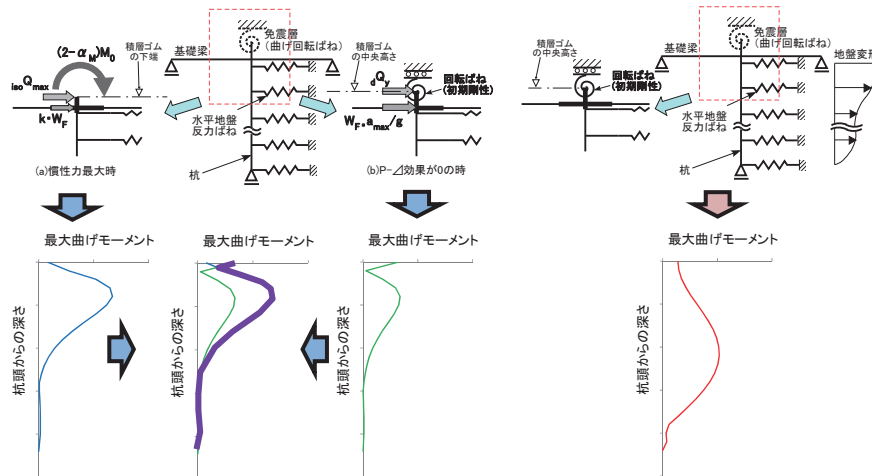


図-4 応答変位法の適用法（左：慣性力作用時、右：地盤変形作用時）