

## 論文の内容の要旨

論文題目 エネルギー回生を導入したセミアクティブ制震オイルダンパに関する研究

氏 名 福 田 隆 介

本論文は、エネルギー回生を導入したセミアクティブオイルダンパについて論じている。1995年の兵庫県南部地震や2011年の東北地方太平洋沖地震などの大地震を経験した現在の日本では、建物の耐震安全性確保だけでなく、居住者の不安感軽減も重要な課題であることが広く認識された。すなわち、地震時の大振幅だけでなく、後揺れ・風揺れといった繊細なレベルの揺れまで大きく低減することが強く望まれている。構造物の応答低減を目的として、様々な制震装置や制震システムが開発・実用化されている。制震装置の設置形態の観点から分類すると付加質量型、棟間設置型(連結制震型)、層間設置型に分類できる。また、動作原理を基に、外部からのエネルギー供給により建物に制御力を加える「アクティブ型」、外部からのエネルギー供給を受けずに装置の受動的な抵抗力を減衰力として利用する「パッシブ型」、および両者の中間にあたる外部から僅かなエネルギー供給を受け制御を行う「セミアクティブ型」に大別することができる。その中でも層間設置型のオイルダンパは微小振幅から大振幅まで効果を発揮する高性能なデバイスであり、弾塑性ダンパよりも高価ではあるが、社会的ニーズの高まりにより採用される事例が増えている。ところで、取付部材を介して建物の層間に設置されたオイルダンパの力学モデルは所謂 Maxwell モデルで表される。この Maxwell モデルの剛性には、ダンパ本体の剛性だけでなく周辺架構の影響が含まれるため、建物フレーム剛性に対して相対的に小さな値に限定される。この剛性による制約条件下において、減衰係数を可変とすることでエネルギー吸収効率を最大化する「最大/最小の2段階に ON/OFF 制御する可変減衰制御則」が提案され、実大装置開発および実適用後の効果検証によってその効果が確かめられている。従って、この制御則に従う減衰係数切替型オイルダンパのエネルギー吸収効率をさらに上

回る高効率オイルダンパを開発するためには、Maxwell モデルの減衰係数を制御するだけではない新しい概念・技術の導入が必要である。

以上の背景をもとに、「減衰係数可変型 Maxwell モデルの限界効率を上回るエネルギー吸収能力を発揮する簡潔で信頼性の高い制震システムを構築・実用化すること」を本研究の目的とした。研究の骨格は以下の通りである。

I. エネルギー回生の原理によるオイルダンパの制御能力及びその限界に関する定量的解明

II. 簡潔かつ信頼性の高いセミアクティブオイルダンパの開発

本論文は 6 章から構成されている。以後、各章における結論をまとめる。

1 章では、本研究の背景、目的と既往の研究及び本論文の構成について示した。

2 章では、本論文で提案するエネルギー回生型オイルダンパの重要な比較対象である既開発のオイルダンパについて既往の研究成果を整理した。対象としたオイルダンパは、減衰係数を一定とした減衰係数固定型オイルダンパと Maxwell モデルの剛性条件下でエネルギー吸収効率を最大化することを目的として開発された ON/OFF 型制御を採用した減衰係数切替型オイルダンパである。これらの機構と原理、力学モデルについて示した後、基本特性について示した。また、各オイルダンパのエネルギー吸収能力と減衰付加効果について示した後、3 章での比較に備えてリリーフ機構を考慮した等価線形特性について示した。

3 章は、本研究の目的 I に対応したものであり、エネルギー回生の概念を導入した高効率制震オイルダンパを提案し、動作原理やエネルギー吸収効率、地震応答低減効果などの基本的な特性について明らかにした。

(1) エネルギー回生型オイルダンパの基本構成は、シリンダの外に回生タンクを搭載し、シリンダ室間とシリンダと回生タンクの間には制御弁を組込んだ構成となっている。従来のオイルダンパが全て熱に変換して消散していた振動エネルギーを、一旦回生タンク内の作動油に歪エネルギーとして回収し、ダンパ変形を拡大するタイミングで再利用する「エネルギー回生」の原理を導入することでエネルギー吸収効率を向上させるものである。ブレース等のフレームへの取付部材を含む本装置の力学モデルは、減衰係数可変型 Maxwell モデルと直列にエネルギー回生機構を表す減衰係数可変型 Voigt モデルが接続した 4 要素モデルで表される。力学モデルの 4 要素化が Maxwell モデルの減衰係数制御では絶対に実現できないエネルギー吸収効率を可能としている。

(2) エネルギー回生型オイルダンパのエネルギー吸収効率に対する装置部剛性（ブレース剛性とシリンダ内封油剛性の直列和）に対する回生タンク内封油の剛性の比（タンク剛性比  $\beta$ ）の影響を定量的に評価した。タンク剛性比  $\beta$  を 1 程度に設定すれば、定常的な外乱に対して減衰を一定とした一般のオイルダンパの約 4 倍、従来の減衰係数切替型オイルダンパの約 2 倍のエネルギー吸収効率を発揮することを明らかにした。地震外乱に対しては、タンク剛性比が見かけ上増大したのと同じ特性となることを示した。荷重制限がある場合を含め、本ダンパの制御効果は「見かけ上の装置部剛性の向上」として統一的に解釈することができることを明らかにした。

4章は、本研究の目的Ⅱに対応したものであり、3章において提案したエネルギー回生の原理を具現化した実システムについて示した。

(1) 開発したシステムの特徴は、エネルギー回生機構の制御方式として、実績豊富な電磁弁を用いたセミアクティブ方式を採用することで、15年に渡る実績を有する減衰係数切替型オイルダンパのノウハウを最大限に活用した、信頼性の高いシステムを実現している。3章の考察結果に基づき、エネルギー回生型オイルダンパの基幹要素である回生タンクの目標剛性を、ブレース等の取付構造の剛性を考慮した時のタンク剛性比が概ね1となるよう、装置単体剛性の約0.5倍と設定して容量を決定した。その結果、回生タンクの寸法をマニホールド上にバルブブロックと並列に搭載できる範囲に収めている。

(2) 既開発のオイルダンパと同様、内蔵センサの情報のみを用いた自律分散型制御方式を採用することで、実建物における施工性やロバスト性を向上させている。更に、電源、センサ、CPU等の異常に備える多重の監視機能を備えており、異常時にはパッシブ型の従来切替型オイルダンパと同等の油圧回路に切り替わるフェイルセーフ機構を内蔵している。

(3) 実大試作装置を用いた動的加力実験を実施し、エネルギー回生機構が所定通り適切に動作し、理論的に予測されたエネルギー吸収効率を実際に発揮することを確認した。非定常な地震応答波形に対しても所定の制御が行われ、安定したエネルギー吸収効率を発揮することも確認した。エネルギー回生型オイルダンパの力学モデルとして提案した4要素モデルを用いたシミュレーション結果は、エネルギー回生に伴う圧力移動の様子を含めて、実験結果と非常に精度良く一致しており、提案した力学モデルおよび数値解析手法が実現象を適切に表現できることを明らかにした。

5章では、エネルギー回生型オイルダンパを多層建物に適用した場合の応答低減効果および付加減衰定数について考察した。検討には、実際の装置特性を精度良く表現できることが確認された装置解析モデル(数値解析モデル)を用いた時刻歴応答解析を実施し、代表的な既存の制震装置(減衰固定型と従来固定型)と比較した。限られた検討範囲ではあるが、エネルギー回生型オイルダンパは、装置荷重制限以下の入力レベルに対してだけでなく、荷重制限を受ける場合においても、既存の他の制震装置に比べ高い応答低減効果・減衰付加能力を発揮することを示した。また、3章で示したエネルギー回生型オイルダンパの付加減衰定数の推定式の多層建物に対する有効性を検討した結果、1次モードが支配的な自由振動だけでなく、地震応答に対しても有効であることを明らかにした。

6章は、本研究の内容を総括すると共に、今後の研究課題についてまとめている。