

氏名（本籍） よこ やま あつ き 横山 篤 貴（栃木県）  
学位の種類 博士（工学）  
学位記番号 甲第 1150 号  
学位授与の日付 2023 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 **剛性付加機能を有するオイルダンパーの開発  
および構造的特性に関する実験的研究**

論文審査委員 （主査）教授 高橋 治  
教授 今本 啓一 教授 栗田 哲  
教授 伊藤 拓海 准教授 熊谷 亮平  
准教授 宮津 裕次  
東京電気大学大学院 工学研究科機械工学専攻  
特別専任教授 藤田 聡

## 論文内容の要旨

本論文では、剛性と減衰を有する複合ダンパーに関する研究を行った。

建築構造に関わる法規制は、1981 年を境に大きく変化した。1995 年に発生した兵庫県南部地震では多くの建築物が倒壊し、それに伴う人的被害が拡大した。倒壊した建築物の多くは 1981 年の建築基準法、同施行令改正以前に設計、施工されたものであり、これらの建築物の耐震診断および耐震改修を促進することが必要とされた。そのため、同年に「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が施行されるなどの対策が進められ、多くの人を利用する一定規模以上の建築物、一定量以上の危険物を取り扱う貯槽場、処理場を中心とした建築物に対して耐震診断が義務付けられた。一方、工場建屋や事務所ビル等の建築物は耐震診断の義務付け対象外とされた。耐震診断では、耐震診断基準等の構造耐震指標（ $I_s$  値）、保有水平耐力に係わる指標（ $q$  値）に基づく静的評価法において建築物の性能を確認するのが一般的であり、建築物の耐震性能が十分でない場合には耐震改修が行われる。東北地方太平洋沖地震が発生した 2011 年以降からは、BCP（事業継続計画）が注目され、大地震発生時の損害を最小限に抑え、地震発生後も事業が継続できることが重要視されるようになったため、近年では既存建築物の耐震補強に制振装置や免震装置が用いられることが多くなった。また、耐震診断の義務付け対象外とされた工場建屋や事務所ビル等の建築物に対しても、耐震診

断、耐震補強が実施されるようになった。

1981年の法改正以前に設計された鉄骨造建物の中で工場建屋や倉庫を用途とする建物の多くは、法改正後に設計された鉄骨造建物と比べると剛性が低いため、地震や風などの外乱発生時の応答変位が大きくなることが想定される。そのため、耐震改修において、既存の建物に減衰を付加する制振装置だけでなく、剛性を付加するブレースのような補強材を同時に設置することで、建物の応答変位を抑制する場合が多い。しかし、その場合にはそれぞれの補強部材を建物の別々のフレームに設置する必要があり、補強箇所が増えることによる施工期間や工事費の増大、開口部の減少による利便性の低下といった施工上の問題や生産活動に関わる問題が発生する。また、工場建屋内には既に大型の機械が配置されていることが多く、通常の生産活動のためにフォークリフト等の車両が通過できる開口を確保する必要があるため、容易に補強が可能となる箇所は限られる。建物に剛性と減衰を付加する方法としては粘弾性体を用いた制振装置が挙げられるが、古い工場建屋では空調管理や断熱材によって温度管理が十分に行われていない場合が多いため、通常の粘弾性体の適用範囲である10℃から30℃で使用することは難しい。

よって、工場のような建物の耐震補強では、一つの装置で剛性、減衰を付加できる、温度変化による性能変動が小さい制振装置の適用が望まれることから、剛性付加機能と減衰を有するオイルダンパーを開発した。本ダンパーは、温度変化によるせん断剛性の性能変動が限りなく小さい低損失粘弾性材料と鋼板を組み合わせたせん断抵抗ばねと摩擦機構を直列に結合したものをオイルダンパーに並列にして組み合わせた複合ダンパーである。また、本ダンパーは、通常用いられているオイルダンパーの機能に加えて日常風レベルの振動や稀に発生する地震相当の振動ではせん断抵抗ばねの抵抗力により建物の変形を抑制する。また、粘弾性体ばねに直列に接合された摩擦機構が作動する際の摩擦力を極稀に発生する地震相当の振動で摩擦機構が作動するように設定することで、摩擦機構が粘弾性体ばねから発生する荷重を制限する役割を果たし、粘弾性体ばねによって取り付け部材に過大な応力が発生するのを防ぐことができる。著者の知る限り、このように粘弾性体を主にエネルギー吸収の目的でなく剛性付加の目的に使い、オイルダンパーと併用した複合ダンパーの例は過去に存在しない。以後、本ダンパーをばね付オイルダンパーと呼称する。

本論文では新たに開発したばね付オイルダンパーの基本特性を確認すること、解析モデルを提案し、解析モデルの妥当性を確認すること、本ダンパーの有効性を示すことを目的とし、研究を実施した。

本論は全6章と本論末尾に付した付録で構成される。以下に各章の概要を示す。

## 第1章「序論」

研究の背景、粘弾性体ダンパーおよび複合ダンパー、構造耐震指標 ( $I_s$  値) に関する既往の研究、研究の目的を示し、本論文の構成について述べた。

## 第2章「剛性付加機能を有するオイルダンパーの構成および特性」

ばね付オイルダンパーの構成と単体性能試験の結果について示し、ばね付オイルダンパ

一の基本特性や各種依存性、繰り返し耐久性を確認した。

### 第3章「剛性付加機能を有するオイルダンパーの解析モデル」

粘弾性体ばねのモデル化の違いによるばね付オイルダンパーの2種類の解析モデルについて述べ、試験結果と解析モデルを用いて計算した解析結果を比較することで、提案する解析モデルの妥当性を確認した。

### 第4章「1質点系モデルを用いた時刻歴応答解析での検討」

実在する工場建屋を模擬した1質点系モデルを用いて時刻歴応答解析を行うことで、ばね付オイルダンパーの解析モデル化の違いによる1質点系モデルの応答値への影響とばね付オイルダンパーの有効性を確認した。

### 第5章「剛性付加機能を有するオイルダンパーを用いた建物の換算 $I_s$ 値、換算 $q$ 値」

耐震診断基準等の構造耐震指標 ( $I_s$  値)、保有水平耐力に係わる指標 ( $q$  値) に基づく静的評価法において、ばね付オイルダンパーの減衰による応答低減効果を考慮する方法を示した。

### 第6章「結論」

本研究で得られた研究成果を示した。

#### 付録

付録では、ばね付オイルダンパーで使用している低損失粘弾性材料の温度依存性、振動数依存性に関する資料を示した。

以上

## 論文審査の結果の要旨

本論文では、学長からの審査付託を受けて、標記6名の審査委員で構成する審査委員会を組織し、提出された学位論文について審査を行った。

審査委員会では、学位申請者より学位論文の内容、あるいは前回審査における指摘事項に対する対応結果について説明し、その後、質疑応答を実施することで博士論文として満たすべき条件や必要な修正点を確認するという形式で進めた。

第1回審査では、学位申請者から学位論文の概要について説明が行われた。質疑内容、指摘事項は以下の通りである。

1. 粘弾性体をばねモデルや Voigt モデルでモデル化しているが、分数微分モデルや三要素モデルのようなより広い範囲で適用できる複雑なモデルでのモデル化を行うことは考えなかったのか。

→せん断弾性率、損失係数の振動数依存性の影響が小さい粘弾性体を使用しているため、Voigt モデルでモデル化している。計算結果は試験結果を十分な精度で模擬できていると考えたため、より複雑なモデルでモデル化を行うことは考えなかった。

2. 最大速度や最大ストロークなどのダンパーに関する性能の限界をまとめた方がよい。

3. 改良モデルでモデル化を行った場合の解析結果と試験結果の誤差率について、4秒、振幅 5mm の正弦波と振幅 5mm のランダム波入力時では誤差率が約 15%と他の条件に比べて大きい理由はなぜか。

→粘弾性体の変位依存性を考慮したモデル化を行っていないからである。該当する試験条件において誤差が大きい理由を説明するスライド資料を作成する。

4. 負担せん断力の分担についてはどうであるか。ダンパーがせん断の大部分を負担しているのか。

→負担せん断力についてまとめた資料を作成し、次回審査会にて説明を行う。

5. 粘弾性体ばねの剛性と摩擦機構の摩擦力の数値を設定した根拠はなにか？

→工場補強によく用いられる山形鋼の剛性と降伏荷重と概ね同等となるように粘弾性体ばねの剛性と摩擦機構の摩擦力を設定した。

6. 摩擦機構の試験結果を見ると、履歴形状は矩形ではなく平行四辺形の形状であることから、なんらかの剛性の影響を受けていると考えられるが、これはなにか。

→摩擦機構単体でなく、粘弾性体と摩擦機構を直列に接合したユニットで試験を行っているため、粘弾性体ばねの剛性の影響が生じているためである。

7. オイルダンパーの減衰特性を  $I_s$  値、 $q$  値の静的評価法に換算する方法については理解したが、摩擦機構のエネルギー吸収能力は考慮していないのか。

→ $I_s$  値を算出する際に摩擦機構のエネルギー吸収能力は靱性指標として考慮している。該当項目を説明するスライド資料を追加する。

8. 既往の研究についてのスライドがない。それらを説明した方が本ダンパーの新規性や他のダンパーとの比較ができ、よりわかりやすくなると考えられる。

9. 過去に存在する制振装置でばね付オイルダンパーに似たようなものはあるのか？

→過去には粘弾性体ばねと摩擦機構を組み合わせたような制振装置は存在する。しかし、オイルダンパーと組み合わせたような複合ダンパーは存在していない。

第 2 回審査では、第 1 回審査における質疑、指摘事項の対応結果について説明があり、それらを受けた内容についての発表を行った。またそれに伴う論文の修正についての確認を行った。第 2 回審査での質疑内容、指摘事項は以下の通りである。

1. ダンパーの取付部材の剛性は考慮しているのか？

→長さ調整用の鋼管の剛性は考慮している。

2. 換算  $I_s$  値と応答値の比較をすると、ばね付オイルダンパーを用いて補強したモデルの層間変形角はとて小さくなっているものの、ダンパーの減衰を評価した換算  $I_s$  値はそこまで大きくないのはなぜか。

→換算  $I_s$  値がそこまで大きくないのは、オイルダンパーの減衰特性をリニア

に置換しており、ダンパーの減衰性能を過小評価しているためである。

3. 特性の異なる粘弾性体の説明方法を工夫したほうが良い。

4. 様々なダンパーの特性を比較した表を作成したほうが良い。

第3回審査では、公聴会を兼ねて実施した。発表内容は指摘事項に適切に沿うものであり、内容として問題のないことを確認した。

以上により、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。