

第6章 結論

第6章 結論

6. 1. 結論

以下に、各章の主な研究成果の概要を示す。

第1章「序論」では、研究背景と既往研究について概観し、本研究の目的を述べた。最後に、本論文の構成を示し、各章で述べる研究内容の概要を示した。

1. 1 節「研究背景と既往研究」

- ・近年、大地震に対する建物の安全性を向上させるための受動型制震装置（ダンパ）や、それらを組み込んだ構造体の振動特性の研究が行われている。
- ・各種ダンパは、性能安定性、耐久性、及びエネルギー吸収能力において長短所を有しており、鋼材の弾塑性ダンパ以外では、建築の主要構造部材と同等の信頼性を有しているものはない。
- ・振動特性の研究においては、ダンパによる減衰付加性能に大きく影響するダンパと直列に存在するバネ要素がこれまでほとんど考慮されることがなく、最近になってこれを考慮した振動特性や設計法に関する研究が行われている。
- ・実建物の適用における実験などで確認された付加減衰量が、設計時に設定した振動解析モデルとの関係において、妥当なものであることを確認した研究は見あたらない。

1. 2 節「研究目的」

- ・高層建物のような大型構造物に対しても、従来の同種の制震構造と比べて比較的高い減衰性能（減衰定数で10%）を与える高減衰構造に関する研究である。
- ・本構造の構成は、減衰係数Cを実現する受動型制震装置（オイルダンパ）を柱梁フレーム内にブレースを介して組み込むものである。
- ・構造物の減衰性能を減衰定数で10%以上に高めることで、地震動の卓越成分を低減し、個々の地震動特性に比較的依存しない建物応答が得られる。
- ・本構造の振動モデルは、オイルダンパのバネ要素とブレースのバネ要素を合成した付加剛性に、オイルダンパのダッシュポット要素を直列に配置したマックスウエル型モデルが、柱梁フレームのせん断剛性を表すバネ要素と並列に配置された3要素マックスウエル型モデルとなる。
- ・この振動モデルでは、通常フォークト型モデルのように、減衰係数の増加により減衰定数が一律に増加せず、減衰定数は所定の減衰係数で最大値を示してその後低

下する傾向を示す。本研究では、まずこの特性に着目して振動特性を論じた。

- ・ オイルダンパは、建築の主要構造部材としての性能安定性、耐久性を有すると共に、効率的な使用を実現するための減衰力の制限機構を有することを目標とした。
- ・ 信頼性の高い受動型制震装置による高減衰構造の実現は、大型構造物に対しても高い減衰性能を付与し、不確定な地震動に対する安全性が増すことで柱梁フレームの省力化・均一化も可能となる。

1. 3節「本論文の構成」

- ・ 本論文の構成を示し、各章で述べる研究内容の概要を示した。

第2章「制震システム」では、高減衰構造の振動モデルである3要素マックスウェル型モデルの基本的な振動特性を検討し、設計に有効となる指標に関して考察した。また、実建物を想定して振動解析モデルの諸元を設定し、地震応答解析により応答最大値の傾向、及び応答低減効果を確認した。

2. 1節「高減衰構造の振動特性」

- ・ オイルダンパの減衰係数をパラメータとした複素固有値解析により、減衰定数には最大値が存在し、その値はフレーム剛性に対する付加剛性の比（剛性比）が大きくなる程大きくなること、そして剛性比1.0で20%近い付加減衰定数が得られることを明らかにした。固有周期は、減衰係数の増加と共に徐々に短くなり、フレーム剛性と付加剛性の両方が効いた周期となる。
- ・ 各次の振動モードの節になる層にオイルダンパを設置することで、そのモード次数に対する付加減衰定数を効果的に上げることができる。
- ・ オイルダンパの最適減衰係数（減衰定数が最大となる減衰係数）は、質量と円振動数に比例し、剛性比の関数となる。この時の付加減衰定数は、剛性比のみにより決まり、剛性比が大きくなる程大きくなる。
- ・ オイルダンパを最適減衰係数に設定した場合の定常入力に対する共振時応答値を定式化し、剛性比をパラメータとした時刻歴応答解析による応答値との一致を確認した。その結果では、主構造の応答値は、剛性比の増加に伴う付加減衰定数の増加により減少し、発生減衰力は、主構造の応答値が減少することでほぼ同程度の値を保持した。これらより、剛性比の増加は応答低減効果を向上させるのみならず、オイルダンパの減衰力も抑制してエネルギー吸収効率にも貢献することが明らかとなった。
- ・ オイルダンパを最適減衰係数に設定した場合の地震入力に対する応答最大値は、定

常入力と同様の計算式に、対象地震の応答スペクトルを代入することで推定が可能である。これを、固有周期1秒、2秒、4秒のせん断型1ユニット、及び5ユニットモデルにBCJ1を入力した地震応答解析結果の減衰力総量で比較すると、計算値は応答値に対して±20%の範囲内にあり、良好に応答最大減衰力を推定できることを確認した。

- ・ 定常入力におけるオイルダンパの減衰力制限による付加減衰定数の低下は、剛性比が大きな程顕著であり、これは減衰力制限によるダンパ部速度の増加量の差に起因すると考えられる。また、オイルダンパの吸収エネルギー量は、減衰力制限比（線形減衰係数時の発生減衰力に対する減衰力制限値の比率）0.4まで増加し、それ以下では減少する。そして、主構造の応答を同一にした場合には、吸収エネルギーは剛性比が大きい程大きく、減衰力制限比0.7までは減少が緩慢である。
- ・ 地震入力において応答低減効果をほとんど損なわない減衰力制限比の推奨値は、0.6～0.8であり、場合により最小0.3まで制限することができる。

2. 2節「建物モデルの振動特性」

- ・ 1次固有周期1、2、3、4秒の実建物を想定した振動解析モデルにおける剛性比は、各建物とも平均で0.5前後であり、付加減衰定数10%程度の高い減衰性能が確保できる。
- ・ 実建物の層せん断剛性の典型である台形分布において、各層ごとに算定した最適減衰係数は、各層ほぼ同一の値となる。
- ・ 線形減衰係数の場合の減衰力総量が、2.1節の研究をもとに建物質量、1次固有周期、刺激関数、剛性比、地震動スペクトルから概ね推定できることを、地震応答解析結果との比較により確認した。
- ・ 地震応答解析結果から、応答低減効果をほとんど損なわない減衰力制限比は0.5～0.8であり、2.1節での研究と同様の傾向を示すことを確認した。

第3章「オイルダンパ」では、高減衰構造を実現するための制震装置（オイルダンパ）の仕様、構成、設計上の留意点を明らかにした。次に、動的加力実験により設計製作した実大オイルダンパの減衰係数、剛性などの性能を確認した。さらに、仕様値をもとにしたオイルダンパの力学モデルにより、代表的な実験結果をシミュレートした。

3. 1節「仕様と構成」

- ・ 必要とされる仕様値は、減衰力:1000kN、減衰係数:50kNsec/mm、剛性:350kN/mm、

振動数：1～0.25Hz程度、使用温度：8～38℃、60年間に想定される繰り返しと経年劣化に対する耐久性である。

- ・設計上の留意点は、温度変化に対する減衰係数を安定させるため油粘性の影響を受けない乱流状態の流体抵抗により減衰力を得ること、設定したバネ値を得るため油の圧縮性とストロークを考慮してピストン面積を設定すること、長期間の使用に耐えるために油とシールに劣化の心配のない材料や構造を採用することである。

3. 2節「性能検証実験」

- ・減衰係数は、油温、及び振動数が高いほど小さくなる傾向があり、剛性は、油温、及び振動数の影響をほとんど受けないことを明らかにした。また、100kN以下の減衰力においては、減衰係数、剛性とも低下し、設計値の $1/3\sim 1/2$ であった。
- ・使用条件下では減衰係数、剛性とも仕様値を達成して $\pm 10\%$ 程度の変動であり、設計上の留意点に注意することで目標とする性能安定性が得られた。
- ・大地震を想定した加振、及び80万回の繰り返し加振に対しても、建築の主要構造部材としての安定した性能を維持した。

3. 3節「シミュレーション解析」

- ・仕様値を用いた非線形ダッシュポットとバネの直列結合されたマックスウェル型モデルにより、減衰力レベル、振動数、油温によらずオイルダンパの特性を良好に表現できた。これにより、応答解析結果の信頼性が裏打ちされた。

第4章「実建物への適用」では、実際に建設された建物への2件の適用事例について、建物概要、及び制震設計方法に関して述べた。

4. 1節「厚木市内の高層事務所ビル」

- ・高さ約110m、26階建て鉄骨造事務所ビルにおいて、高減衰構造化することにより、設計せん断力を低減して設計した柱梁フレームでも地震応答解析における通常の設計クライテリアを満足した。
- ・オイルダンパの減衰力制限機構により、応答低減効果をほとんど低下させることなく、オイルダンパの減衰力を $1/2$ 程度に低減できた。
- ・1992年当時、本建物を高減衰構造化することによるコスト低減は、鉄骨コストに換算して約25%程度であった。

4. 2節「清水市内の中層技術センタービル」

- ・高さ約44m、10階建ての鉄骨造中層建物において、高減衰構造化することにより、通常同規模の建物において困難とされている高層建物と同様の高い耐震性能を確

保できた。

- ・オイルダンパを2層間に渡ったブレースを介して設置する集中配置の一手法により、オイルダンパのストローク、速度が増加することで1台当たりの吸収エネルギーを倍増でき、オイルダンパを効率的に使用できた。

第5章「高層建物における振動特性の評価・検証」では、4.1節で述べた高層事務所ビルでの振動実験、及び地震観測により、高減衰構造の振動特性（固有周期、減衰定数）を確認した。そして、設計時と同様の手法により作成した振動解析モデルにより、振動実験、及び地震観測結果をシミュレートした。

5. 1節「振動実験」

- ・自由振動実験の結果から、強風や中小地震程度の小振幅レベルにおいても、2%程度の付加減衰定数を確認した。

5. 2節「地震観測」

- ・観測地震のフーリエ変換による伝達関数から、竣工前の1995年相模湾地震から1998年東京湾地震にいたる過程で、積載荷重の増加により1次固有周期が長くなる傾向を確認した。これは、入居率の変化による積載荷重の増加が原因である。
- ・加速度応答スペクトルから、地震動の主要成分が建物の2次固有周期以下であることを確認した。

5. 3節「シミュレーション解析」

- ・オイルダンパの小振幅レベルからの特性を表現できる力学モデルを、設計時と同様の手法でフレームモデルに組み込んだ振動解析モデルにより、振動実験、及び地震観測の結果を良好に表現することができた。
- ・地震観測における振動レベルが、建物振動特性、及びオイルダンパ特性との対応を確認することで、設計レベルにいたる大きさであることを明らかにし、設計用振動解析モデルの妥当性を検証した。

6. 2. 今後の展開、及び研究課題

本研究の成果として、オイルダンパを用いた高減衰構造の特性、効果が明らかとなり、主要構造部材として使用できるオイルダンパが実現された。そして、本構造が実際の高層建物等に適用されるとともに、実建物における付加減衰等の振動特性が確認され、さらには振動解析モデルの妥当性も検証された。本研究を魁として、最近では、建築構造物用オイルダンパの開発が多数なされており^{1)~5)}、いくつかの建物への適用が行われている^{6),7)}。今後も同種の制震構造の適用が増えることが予想される。また、これらの建物の中には、振動実験や地震観測が予定されている建物⁸⁾もあり、今後本研究を裏付ける成果の報告も行われるものと期待される。一方において、オイルダンパの適用方法の一つとして、曲げ卓越型連層壁(ブレース架構)の曲げ変形に対してオイルダンパにより減衰能力を付加する新たな架構形式の研究も行っており^{9)~10)}、実建物への適用も図られている¹¹⁾。今後は本研究で得られた成果等を基礎として、オイルダンパの各種適用方法に関する研究・開発の一層の進展が期待される。

今後の研究課題としては、以下の2点が上げられる。

①オイルダンパの剛性の増大

高減衰構造の減衰性能は、フレーム剛性に対する付加剛性の比(剛性比)により大きく影響を受ける。この付加剛性要素は、ブレース剛性とオイルダンパ剛性により成り立っており、おもにオイルダンパ剛性に支配されている。そのため、オイルダンパの剛性を増加させることは、付加剛性全体を増加させることにつながり、付加減衰定数の増大、エネルギー吸収効率の向上に寄与する。剛性増加の方法としては、ストロークを小さく、ピストン面積を大きくすることが有効である。これらの値は応答値に影響されたり、オイルダンパの大きさや重量に影響するため、一概に剛性のみを優先して決定することはできず、それらとのバランスを考慮に入れて検討すべきである。他に、剛性に寄与する要因である作動油の体積弾性係数を増加することが考えられる。つまり、油の中でも比較的体積弾性係数の高い脂肪酸エステルやリン酸エステルを作動油として用いることも有効であり、さらには油以外の液体で非常に高い体積弾性係数を有する水銀等¹²⁾の液体金属を用いた流体ダンパも、耐久性や環境性を考慮に入れた上で研究されるならば有効となろう。

②構造物の耐力や塑性エネルギー吸収とオイルダンパによる付加減衰の兼ね合い

本研究によるオイルダンパの特徴の一つは、減衰力の制限機能を設けていることであり、これにより効率的に建築構造物への適用が可能となっている。しかし、この機構は、振幅の増加とともにオイルダンパの減衰付加能力を相対的に低下させるもので

あり、過剰な減衰力の制限は構造物の安全性にも影響を与える事態となることも予想される。一方、本オイルダンパと類似した特性を有する非線形粘性部材を対象とした減衰付加に関する研究も行われている¹³⁾が、建物に必要となる耐震性能にまで踏み込んだ研究は見あたらない。そのため、フレームの塑性化による損傷やエネルギー吸収と、オイルダンパの減衰力制限を考慮した上でのエネルギー吸収量を勘案して、フレームの耐力とオイルダンパによる付加減衰定数の適切な関係を考察することは、本構造の設計手法を確立するのみならず、オイルダンパの過剰な減衰付加による過度のフレーム耐力の削減を避けるためにも研究すべき課題であろう。

第6章の参考文献

- (1) K.Sunakoda, I.Tamura, H.Dodeyama, 'Development of Large Capacity High Damping Device' Proceedings of PVP Conference, PVP-Vol.275-2, P85-88(1994)
- (2) 小竹祐治、田上 淳、栗野治彦、「建物制震用オイルダンパの開発」、第5回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集、P370-373、1997年11月
- (3) 露木保男、岡部富雄、他、「オイルダンパを用いた制震構造の開発（その1）（その2）」、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅱ、P933-936、1998年9月
- (4) トキコ株式会社、「免震・制震用ダンパ」、技術資料
- (5) 五十幡直文、他、「Maxwell型ハイブリッド粘弾塑性ダンパによる制震構造建物の設計（その1）オイルダンパの性能」、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅱ、P1025-1026、1999年9月
- (6) 高橋 治、他、「オイルダンパを用いた制震構造の開発（その3）」、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅱ、P937-938、1998年9月
- (7) 新居 努、他、「Maxwell型ハイブリッド粘弾塑性ダンパによる制震構造建物の設計（その2）」、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅱ、P1027-1028、1999年9月
- (8) 丹羽直幹、他、「曲げ卓越型構造物の制震に関する研究（その1）」、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅱ、1995年8月、P781-782
- (9) 丹羽直幹、「曲げ卓越型構造物の制震に関する研究（その2）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、1996年9月、P835-836
- (10) 丹羽直幹、他、「曲げ変形制御型制震構造物」、特許番号第2842159号、1998年10月登録
- (11) 日経アーキテクチャー、「柱、梁の無い超高層集合住宅」1998,5,18、P98-99
- (12) 国立天文台編、「理科年表」、平成12年
- (13) G. Pekcan, J. B. Mander, S. S. Chen, 'Fundamental Considerations for the Design of Non-linear Viscous Dampers', Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.28, P1405-1425(1999)