

850kN 油圧ダンパーの開発

— トグル制震装置用大型ダンパー —

Developed of 850kN Type Viscous-Damper for Toggle Response Control Systems

久保田 雅春*¹ 阿部 隆英*² 池田 隆明*³ 高瀬 裕也*³ 前川 康雄*⁴
Masaharu Kubota Takahide Abe Takaaki Ikeda Yuuya Takase Yasuo Maekawa

【要旨】

耐震補強における集合住宅は、住みながら施工と補強設置箇所の低減による要求により、今まで対象としてきた建物のトグル制震ブレース 1 基当たりの減衰力をこれまでの標準的な 500kN ダンパーより大きな減衰力が要求されることとなった。そこで、今までとほぼ同じ取り付け寸法（幅 250mm 程度）で 1.7 倍の 850kN 油圧ダンパーの開発を行うこととなった。本報告は、基本特性である速度依存、周波数依存、温度依存の 3 シリーズについて実験的検証を行い、十分な性能を有する 850kN 減衰力の油圧ダンパーの開発ができたことを報告する。

【キーワード】 耐震補強 油圧ダンパー トグル制震装置 速度依存 周波数依存 温度依存

1. はじめに

1995 年の阪神淡路大震災において、1981 年以前に建設された、いわゆる旧耐震建物が多くの被害を受けてから、これらに対する耐震補強は国の重要政策となっている。

建物の耐震性を高める方法は様々あるが、トグル制震装置¹⁾による制震補強は、設置箇所の数の減少や、補強部材のスリム化により効率よく施工できることから低コスト、工期短縮などを図ることができる。

しかし、集合住宅の住みながら施工においては、居住者の日常生活に影響を与えないことが要求されるため、さらに設置箇所数の低減が求められる。

本研究では、1 基当たりのトグル制震装置の性能をこれまでの標準タイプ（減衰力 500kN）よりさらに高い減衰力を発揮することを目的として、最大減衰力 850kN で且つ取り付け幅 250mm 程度の新たな油圧ダンパーを開発し、その性能を確認するために実験を実施し、ダンパーの基本特性を把握した。

2. 油圧ダンパーの概要

2.1 増幅機構付制震構造に用いるための油圧ダンパーを開発する意義

当社は、これまでの標準として最大減衰力 500kN でストローク ±110mm の油圧ダンパーを開発し実用化している。²⁾

この増幅機構付き制震工法であるトグル制震構法による耐震性の向上は、おおよそダンパーの最大減衰力と設置数の積に比例する。当然、既存建物を耐震補強する場合には、建物の構造上の問題や使用上の問題から必要な個数だけ制震部材を取り付けられない場合がある。集合

住宅の要求仕様として、極力少ない設置個数であることが必要となる。更に、施工の省力化やコスト縮減にもつながるため、最大減衰力の大きな油圧ダンパーを開発する意義は大きい。

2.2 要求性能

表-1 に油圧ダンパーの要求性能を記す。左欄から、項目番号、性能項目、そして要求性能を掲げる。

表-1 油圧ダンパーの要求性能

項目番号	性能項目	要求性能
①	1次減衰係数	10.0 MN・s/m
②	2次減衰係数	0.45 MN・s/m
③	リリーフ減衰力	600 kN
④	最大減衰力	850 kN
⑤	ストローク	±110 mm
⑥	温度依存	-20°C~+80°C

これらの要求性能は、①一般的な既存建物の躯体強度、②ダンパーを取り付けるために要する周辺部材（鉄骨フレームなど）の強度、③これら既存躯体部と周辺部材の連結（接合）部の強度、④著者らが増幅機構付き制震構造に望む設計クライテリアなどを、総合的に考慮して設定したものである。

2.3 油圧ダンパーの機構

図-1 に本油圧式ダンパーの機構概念図を示す。

油圧ダンパーの内部は減衰力を発生する圧力室、温度上昇による作動油の体積膨張分を逃がすアキュムレータ室によって構成されている。シリンダー内の作動油を調

1. 建築事業本部 トグル事業部 2. 建築事業本部 トグル事業部 トグル設計G 3. 技術研究所 第二研究室
4. (株) E&CS トグル制震事業部

圧弁から噴出させたときの流出抵抗によって、減衰抵抗が發揮される。油圧ダンパーが振動によって伸縮すると、作動油は調弁を通して圧力室①、②間を循環する。このとき振動速度に応じて油圧抵抗が発生し、減衰力として作用する。減衰抵抗は作動油の調弁機構を制御することによって速度に比例した特性となる。減衰抵抗-速度特性は、表-1の①から③によるバイリニア特性であることから、速度が大きくなったときに過大な減衰力が生じないようにリリース弁を設けている。

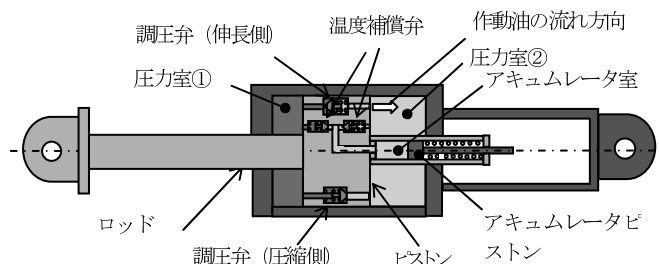


図-1 油圧ダンパーの機構概念図

油圧ダンパーに発生する減衰力は熱エネルギーに変換され³⁾、圧力室の作動油の体積を膨張させる。体積膨張は温度補償弁により作動油がアキュムレータ室へ流入し調整している。また、温度が低下して作動油の体積が縮小すると、圧力室は負圧になりアキュムレータ室の作動油が温度補償弁を通して圧力室に流れる。

3. 油圧ダンパーの性能を確認するための実験計画

本油圧ダンパーの性能を確認するために、以下の3つの実験シリーズを実施する。即ち、①速度依存特性確認シリーズ、②周期依存特性確認シリーズ、そして③温度依存特性確認シリーズである。以下の項に、それぞれの内容を解説する。表-2には、シリーズ毎の加振試験の一覧を示す。

3.1 速度依存特性確認シリーズ

本油圧ダンパーが、表-1の要求性能に挙げた1次減衰係数と2次減衰係数そしてリリース減衰力により決定される減衰力-速度特性を發揮するか検証する必要がある。そこで加振周波数を、中高層の建物の1次固有周期程度となる0.5Hzと1.0Hzの二つに設定し、それぞれ加振速度を2.5、5.0、10.0、そして30.0cm/sの4段階に設定して、計8回の加振を行う。そして、その際に得られるヒステリシス曲線の形状や最大減衰力等について検証する。

3.2 周波数依存特性確認シリーズ

前項では、周波数を2種に固定して加振速度の依存特性を検証するが、建物が受ける地震動のように、複雑な

動的挙動を受ける場合には、様々な周波数による動的荷重を受けることになる。

しかしながら、前項で検証する速度依存特性⁴⁾が、周波数が異なる場合において成立するか否かは保障されない。そこで加振速度を2.5cm/sと10cm/sの2段階に固定して、それぞれ周波数が0.25、0.5、1.0、2.0、3.0Hzとなるように加振する。これらの加振結果から、周波数の違いが減衰力特性にもたらす影響について検証する。

表-2 加振試験の一覧

(a) 速度依存特性確認シリーズ

加振名	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
周波数 (Hz)	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
速度 (cm/s)	2.5	5.0	10.0	30.0	2.5	5.0	10.0	30.0

(b) 周波数依存特性確認シリーズ

加振名	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
周波数 (Hz)	0.25	0.5	1.0	3.0	0.25	0.5	1.0	3.0
速度 (cm/s)	2.5	2.5	2.5	2.5	10.0	10.0	10.0	10.0

(c) 温度依存特性確認シリーズ

加振名	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
周波数 (Hz)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
速度 (cm/s)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
開始温度 (°C)	-20	-10	0	10	20	30	40	50
加振名	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
周波数 (Hz)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
速度 (cm/s)	2.5	2.5	2.5	2.5	10.0	10.0	10.0	10.0
開始温度 (°C)	60	70	80	-20	-10	0	10	20
加振名	T17	T18	T19	T20	T21	T22		
周波数 (Hz)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
速度 (cm/s)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0		
開始温度 (°C)	30	40	50	60	70	80		

3.3 温度依存特性確認シリーズ

本油圧ダンパーに使用する作動油の粘性は温度に依存⁵⁾し粘性が変化する。さらに、この作動油の粘性は油圧ダンパーの性能に影響を与えることが、他の研究⁶⁾において報告されている。例えば実際に油圧ダンパーを建物に適用する場合には、外気温のみならず、地震時に作用するエネルギーの熱変換による自発的溫度上昇などの影響が考えられる。

今回開発するダンパーは、-20°Cから+80°Cの範囲において安定した履歴挙動を發揮することが要求される。

そこで表-2(c)に記すようにこの温度の範囲内で10°Cごとに設定温度を設け、周波数を1.0Hzに固定し、加振速度を2.5cm/sと10.0cm/sとなるように加振する。これらの実験結果から、温度がダンパーの性能に及ぼす影響について検証する。

4. 速度依存特性確認シリーズ

まず初めに、速度依存特性確認シリーズについて実験の概要と実験結果について報告する。

4.1 実験概要

表-3に本実験に用いる加力装置の仕様を記し、図-2にこの装置の概念図を示す。

加振は変位制御で行い、予備加振に3波、各試験の条件に順ずる本加振に2波、加振の収束に3波の計8波を1試験毎に与える。減衰力はダンパーと反力壁との間に取付けたロードセルで、変位量はダンパーに取付けたレーザー変位計で計測する。この加力方法は、本章以降で行う実験シリーズにおいても同様とする。

表-3 加力装置の仕様一覧

項目	仕様
最大出力	動的：±200tf、静的：±280tf
最大変位	±450 mm
最大速度	150 cm/s
駆動方式	電気油圧サーボ式
加振周波数	0.01 ~ 30.0 Hz
加振波形	正弦波、ランダム
ダンパー取付け長さ	3,500mm
ダンパー剛性	120t/cm 以上

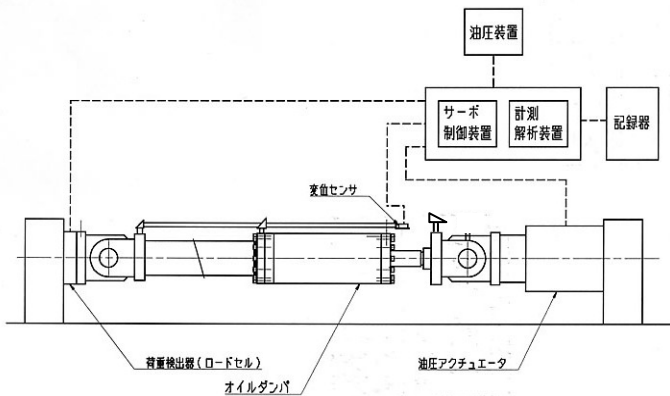


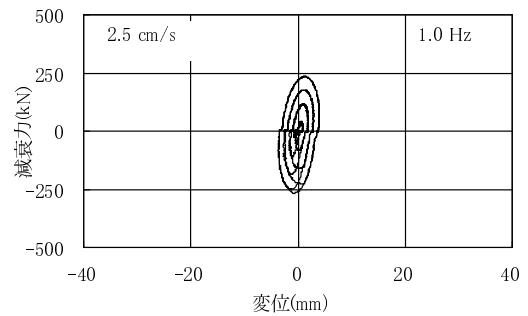
図-2 加振装置の概念図

4.2 ヒステリシス曲線

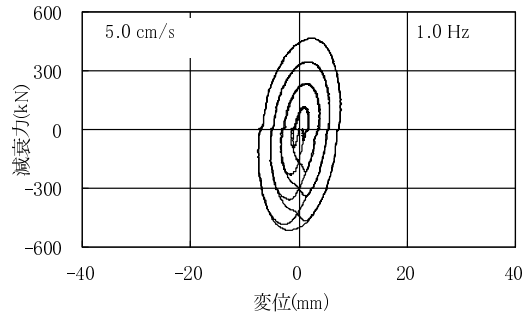
図-3(a)から(d)に、周波数を1.0Hzに設定して、加振速度をそれぞれ2.5、5.0、10.0、そして30.0cm/sとした場合の減衰力-変位曲線を示す。また、図-4に本実験シリーズで設定されている4つの加振速度の減衰力-変位曲線において、目的の振幅時のみを取り出し周波数毎に比較したものを図示する。

図-3の(a)と(b)の加振速度が小さなレベルの実験曲線を見ると、これらの加振速度では、減衰力がリリーフ減衰力に達していないため、伸び側と縮み側の減衰力のピークが尖った形状を呈している。

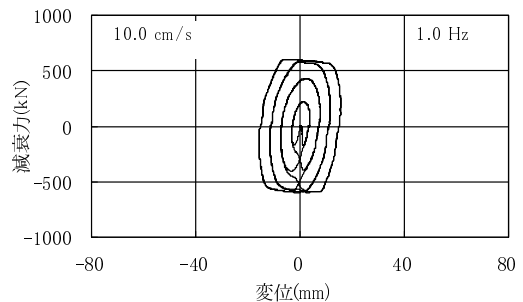
しかし同図の(c)と(d)を見てみると、減衰力がリリーフ減衰力に達しているため、伸び側と縮み側のピークに降伏棚が生じている。



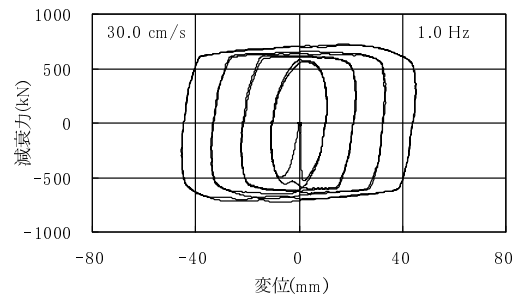
(a) 加振速度 2.5 cm/s の場合



(b) 加振速度 5.0 cm/s の場合



(c) 加振速度 10.0 cm/s の場合



(d) 加振速度 30.0 cm/s の場合

図-3 周波数 1.0Hz の減衰力-変位曲線

また、(a)から(d)の実験曲線に注目してみると、加振時と除振時でほぼ同じ履歴を辿っている。このことから、油圧ダンパーの変位-減衰力の履歴は、載荷ルートには依存しない安定したルートを辿ることが明らかである。なお本実験シリーズでは、この他にも周波数を0.5Hzに設定した加振も行っているが、周波数1.0Hzのものと同様の傾向であった。

続いて図-4の(a)、(b)のグラフを観察する。両図で計8本の実験曲線が描かれているが、履歴速度の違いや周波数の違いによらず、いずれも上下左右にはほぼ対称なループ形状を呈しており、本油圧ダンパーが安定した履歴

挙動を示すことを知ることができる。

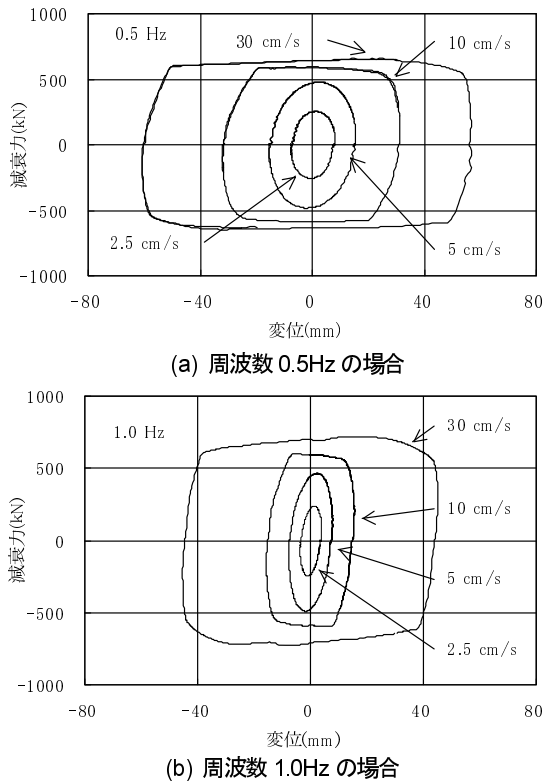


図-4 加振速度を違えた場合の変位-減衰力曲線

4.3 加振速度と最大減衰力の関係

図-5に、本実験シリーズで行った全ての試験において得られる、ダンパーの伸び側（正）と縮み側（負）のそれぞれの最大減衰力とその際の加振速度をプロットしたものを示す。同図には、本油圧ダンパーに要求した減衰力も描かれている。

このバイリニアの直線と実験値とを比較してみると、加振速度が2.5cm/sから10.0cm/sの場合は、殆ど要求性能を満足している。また、加振速度が30.0cm/sとかなり大きくても要求性能の±10%以内に納まっている。これらより、本研究で開発した油圧ダンパーは要求性能を満足していると結論できる。

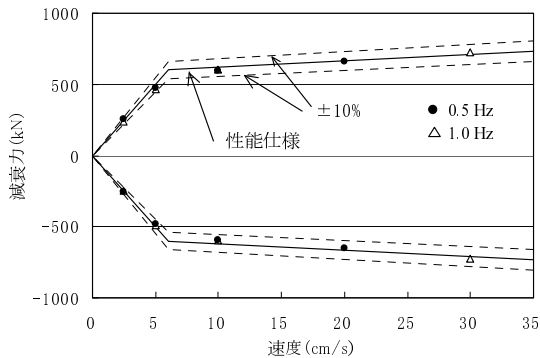


図-5 加振速度と最大減衰力の関係

5. 周波数依存特性確認シリーズ

前章までは、本油圧ダンパーの加振速度による減衰力

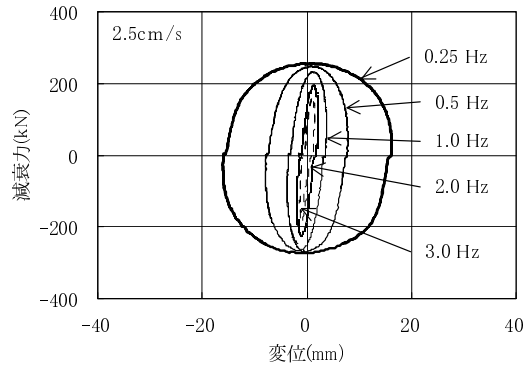
の特性について検証を行い、その結果要求性能をほぼ満足していることが明らかとなった。

そこで、次のシリーズとして、加振周波数の違いによる影響を把握するために、周波数依存特性を検証する実験を行ない、油圧ダンパーの減衰力特性に及ぼす影響について確認する。

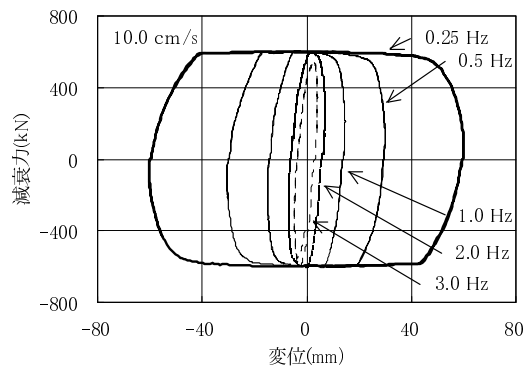
5.1 変位-減衰力曲線

図-6の(a)と(b)に、加振速度をそれぞれ2.5cm/sと10.0cm/sに設定して、周波数を0.25, 0.5, 1.0, 2.0そして3.0Hzに変動して加振した場合の、変位-減衰力曲線を描く。本来、減衰力の特性が加振周波数に依存しないとすれば、加振速度が同一の場合、すべての周波数における減衰力が同じ値を示すことになる。

しかしながら、同図(a)を見ると、周波数が大きくなるにつれ減衰力のピーク値が小さくなる傾向が確認できる。また同図(b)を観察しても、同様の傾向であることが明らかである。



(a) 加振速度 2.5cm/s



(b) 加振速度 10.0cm/s

図-6 周波数を違えた場合の変位-減衰力曲線

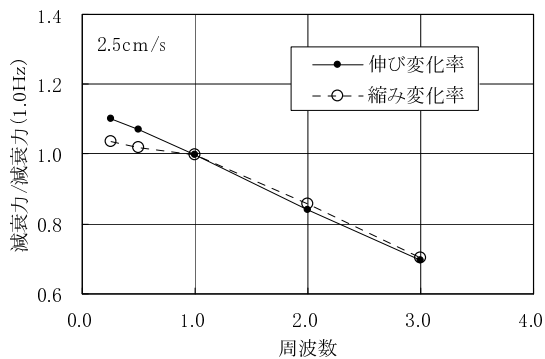
5.2 減衰力の変化率

図-7の(a)と(b)に、各周波数の減衰力を1.0Hzの減衰力で除した変化率を、加振速度別にそれぞれ示す。

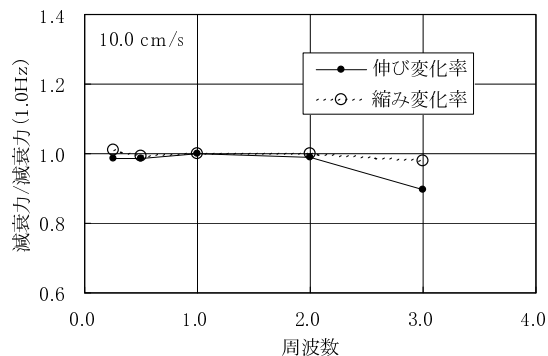
同図(a)を見ると、加振速度が2.5cm/sの場合には、周波数3.0Hzで変化率が30%程度下がる傾向が確認される。

また、変化率は線形に推移する。続いて同図(b)より、

加振速度が 10.0cm/s になると、縮み側の低減は殆どなく、伸び側の低減も 10%程度まで小さくなっている。これは加振速度 10.0cm/s では、リリース減衰力を超え 1 次減衰剛性よりも遙かに剛性の小さい 2 次減衰剛性の領域に加振速度が達し、剛性の低さに随伴して変化率も小さくなったと考えられる。



(a) 加振速度 2.5cm/s



(b) 加振速度 10.0cm/s

図-7 周波数を違えた場合の変位-減衰力変化率

6. 温度依存特性確認シリーズ

最後に温度依存特性確認シリーズとして、油圧ダンパーが受ける温度の違いが減衰力特性に及ぼす影響について確認する。

6.1 変位-減衰力曲線

図-8 に設定開始温度が -20°C 、 $+20^{\circ}\text{C}$ 、 $+80^{\circ}\text{C}$ の際の変位-減衰力曲線を示す。

この図を見てみると温度が異なる曲線においても、同じ加振速度で殆ど同じ曲線を描いており、変位-減衰力の履歴は温度の差異に影響を受けないことが理解できる。

6.2 減衰力の変化率

図-9 の(a)と(b)に、各設定開始温度における減衰力を設定開始温度 $+20^{\circ}\text{C}$ の減衰力で除して変化率を求めたものを、2 種の加振速度別にそれぞれ示す。

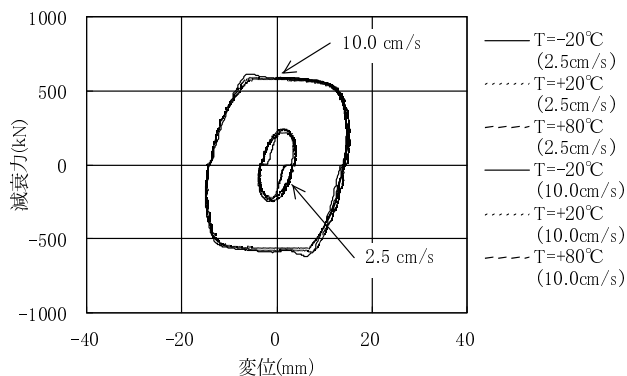
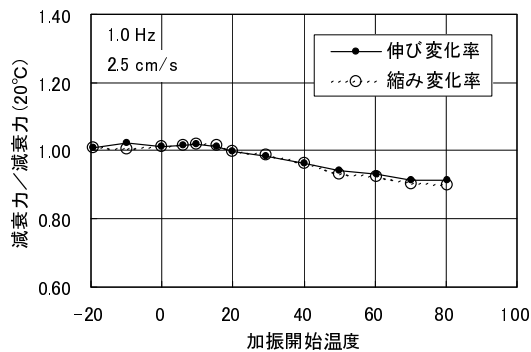


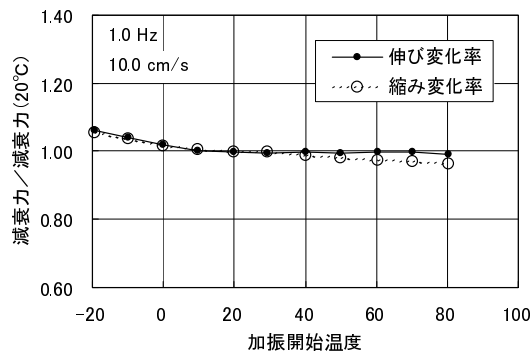
図-8 加振開始温度が異なる場合の変位-減衰力曲線の一例

同図(a)を見ると、設定開始温度が $+30^{\circ}\text{C}$ を超えると、徐々に変化率が小さくなり、 $+70^{\circ}\text{C}$ 以上では、およそ 0.9 に一定となっている。同図(b)の加振速度が 10.0cm/s の場合には、低い設定加振温度で僅かに変化率が高くなるものの、 $+10^{\circ}\text{C}$ 以降の挙動はほぼ 1.0 で一定となっていることが確認できる。

周波数依存特性と同様に、補強効果が期待される大きな加振速度で変化率がほとんど変わらないため、本油圧ダンパーの温度依存特性に問題は無いと判断する。



(a)加振速度 2.5cm/s



(b)加振速度 10.0cm/s

図-9 加振開始温度が異なる際の減衰力の変化率

7. まとめ

本論では、トグル制震装置に用いるため新たに開発した 850kN 油圧ダンパーの概要と、この基本性能を確かめるために実施した実験の 3 シリーズについて報告した。

速度依存特性確認シリーズでは、速度依存特性において、要求した性能を十分に満足していることが明らかとなった。

周波数依存特性確認シリーズでは、次のことが明らかとなった。周波数 3.0Hz における周波数依存特性は、加振速度 2.5cm/s では減衰力の変化率が 30%程度低減するが、加振速度 10.0cm/s ではその低減は約 10%まで小さくなる。

温度依存特性確認シリーズでは、加振速度 2.5cm/s では温度が高くなるにつれ減衰力の変化率が約 10%小さくなるが、加振速度が 10.0cm/s まで大きくなると、その影響はほとんど無視することができる。

1.1. 今後の展望

今回は 850kN という限定した油圧ダンパーの実験的検証を行った。油圧ダンパーという粘性系のダンパーの基本特性を把握することはできたが、このダンパーの持つポテンシャルとしての限界性能（速度、減衰力）と仮に壊れるとした場合のクリティカルとなる部位（部品）などについて知っておく必要があり、疲労による性能の変化などまだまだ構造的に把握すべき課題は残されている。

そして、ダンパーは機械製品という性質上、製造の品質管理が重要であることは言うまでもない。

しかし、今回の 850kN ダンパーの開発により、トグル制震装置のバリエーションが増え、より多角的に制震補強を進めて行くことができるものと思う。

また、現在の建築基準法において、作動油を用いた粘性系のダンパーは指定建築材料（法 37 条）の大臣認定を受けるルートがないため、一般化できず個別の時刻歴による建物全体での評価しか認可されない。この点に関する一日も早い法の改善を望むものである。

最後に、これからもさらなる研究・開発を行い、より良い技術を世の中に出していきたいと切に思う。

謝辞: 日立オートモティブシステムズ株の太田様を初め、本実験に関わって頂いた方、助言を頂いた方のご協力の下、短時間で貴重な成果を上げることができました。ここに紙面をお借りして厚く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 久保田雅春, 秦一平, 石丸辰治, 新谷隆弘: 増幅機構を用いた制震構造システムに関する研究, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.31-34, 1998
- 2) 阿部隆英, 久保田雅春, 高瀬裕也, 前川康雄, 太田博之: 増幅機構付制震工法に用いる 850kN ダンパーの開発 その 1 油圧ダンパーの概要と性能確認のための実験計画, 日本建築学会学術講演会, 2009.8
- 3) 阿部隆英, 久保田雅春, 高瀬裕也, 前川康雄, 太田博之: 増幅機構付制震工法に用いる 850kN ダンパーの開発 その 2 速度依存特性確認シリーズの実験結果, 日本建築学会学術講演会, 2009.8
- 4) 高瀬裕也, 久保田雅春, 阿部隆英, 前川康雄, 太田博之: 増幅機構付制震工法に用いる 850kN ダンパーの開発 その 3 周波数依存特性確認シリーズと温度確認性能シリーズの実験結果, 日本建築学会学術講演会, 2009.8
- 5) 浅見敏彦, 木村文義: 動圧オイルダンパの減衰力の温度依存性について, 日本機械学会論文集 (C 編), 65 巻 629 号, pp.88-95, 1999
- 6) 和氣知貴, 笠井和彦, 大木洋司, 持丸昌己, 沖村明彦, 佐々木和彦: せん断型粘性体ダンパーの振動数・振幅・温度依存性を考慮したモデル化に関する研究 その 1: 材料試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. B-2, pp.75-76, 2004
- 7) 佐々木和彦, 笠井和彦, 大木洋司, 持丸昌己, 沖村明彦, 和氣知貴: せん断型粘性体ダンパーの振動数・振幅・温度依存性を考慮したモデル化に関する研究 その 2: 基礎履歴モデルの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. B-2, pp.77-78, 2004

Summary In the seismic retrofit of condominiums, demand has been increasing for “construction while in service” and the reduction of space for installing retrofitting members. Then, a greater damping force has been required per seismic response control brace using toggles than 500-kN provided by conventional standard dampers. A hydraulic damper of 850 kN, 1.7 times higher than the conventional level, requiring the same space for installation was developed. Tests were conducted to verify its dependencies on velocity, frequency and temperature. As a result, it was confirmed that the new damper offers adequate performance.

Key Words: Seismic Retrofit, Oil-Damper, Toggle-Response Control System, Velocity Dependence, Frequency Dependence, Temperature Dependence