

エネルギー吸収効率に着目したON/OFF型パッシブオイルダンパ

High-Performance Passive Hydraulic Damper with Semi-Active Characteristics

田 上 淳 松 永 義 憲
栗 野 治 彦¹⁾ 山 田 俊 一¹⁾

要 約

筆者らは、内部油圧変動に基づいて流量制御弁の開閉状態が自動的に切り替わることで、外部エネルギーを一切供給することなく、先に考案した ON/OFF 型セミアクティブオイルダンパ HiDAX（ハイダックス）に迫る高いエネルギー吸収能力を発揮する全く新しいパッシブオイルダンパを考案した。当装置の性能を確認するために、考案した油圧回路ブロックを登載した実大の試作装置を製作し、種々の動的加力実験を行った。実験の結果、当装置は HiDAX に類似した特徴的な荷重変形特性を示し、従来型パッシブオイルダンパを大きく上回るエネルギー吸収能力を安定的に発揮することが確認された。

目 次

- I. はじめに
- II. ON/OFF 型セミアクティブ制御則
- III. ON/OFF 動作を実現するパッシブ油圧回路
- IV. 実大試作装置の性能確認実験
- V. まとめ

I. はじめに

筆者らは、オイルダンパに内蔵した制御弁を外部からの供給電力により ON/OFF の 2 段階に切り替えることで、構造物における現実的な取り付け条件の下でエネルギー吸収効率を大幅に高めるセミアクティブオイルダンパ HiDAX（ハイダックス）を開発し¹⁾、実建物への適用と効果の検証を行ってきた^{2)~3)}。

ここで新たに提案する装置は、オイルダンパの内部油圧変動に基づいて制御弁の開閉状態が自動的に切り替わることで、外部電力を一切供給することなく HiDAX と類似の挙動を実現する、全く新しいパッシブオイルダンパである。提案するオイルダンパの特長を改めて整理すると、以下の通りとなる。

- a. 従来型パッシブオイルダンパを上回り、セミアクティブオイルダンパ HiDAX に迫る高いエネルギー吸収能力を電力供給なしで実現する。
- b. HiDAX を構成する上で必須のセンサ、コントローラ、電磁バルブ、各種配線などが一切不要となり、従来型パッシブオイルダンパと同等のシンプルな装置構成となる。
- c. 従来型パッシブオイルダンパや一般油圧機器などで多く用いられている汎用的な機械部品のみで構成されており、耐久性に優れるとともにメンテナンスも簡易である。

本報では、まず提案した装置の油圧回路と動作原理の概要を述べ、次に実大試作装置に対して実施した性能確認実験の結果を示し、制震ダンパとしての基本的な性能について論じる。

II. ON/OFF 型セミアクティブ制御則

1. 力学モデル

ブレースなどを介して建物層間に設置された層間ダンパの力学特性は、Fig. 1 に示す Maxwell モデルで表される。ここで k_b はブレース剛性、 k_d は装置剛性、 $C(t)$ は時刻 t における装置の減衰係数である。従来型パッシブオイルダンパでは、 $C(t)$ はある一定の値 C に固定される。一方、(広義の) セミアクティブオイルダンパでは、制御弁の開度を制御することで、 $C(t)$ の値を最大値 C_{max} と最小値 C_{min} の間で制御することが可能である。

2. 従来型パッシブダンパのエネルギー吸収能力

調和変形 $x = \delta \sin \omega t$ を受けるパッシブダンパ（線形 Maxwell モデル）が 1 サイクルに吸収するエネルギー量は、減衰係数を $C = k/\omega$ に設定した場合に最大となり、その値は次式で表される。

$$\Delta W = \frac{\pi}{2} k \delta^2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

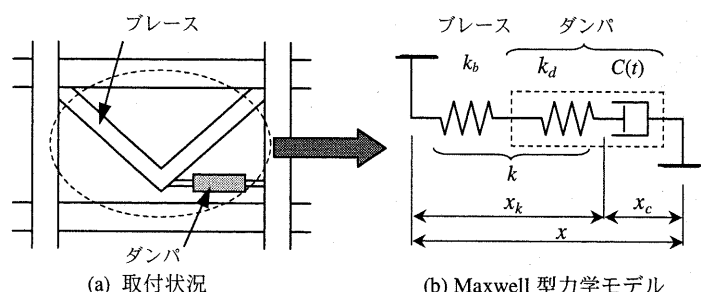


Fig.1 層間ダンパの力学モデル
(Mechanical Model of Damping Device)

1) 小堀研究室

キーワード: 制震構造, オイルダンパ, エネルギー吸収, Maxwell モデル, セミアクティブ, パッシブ

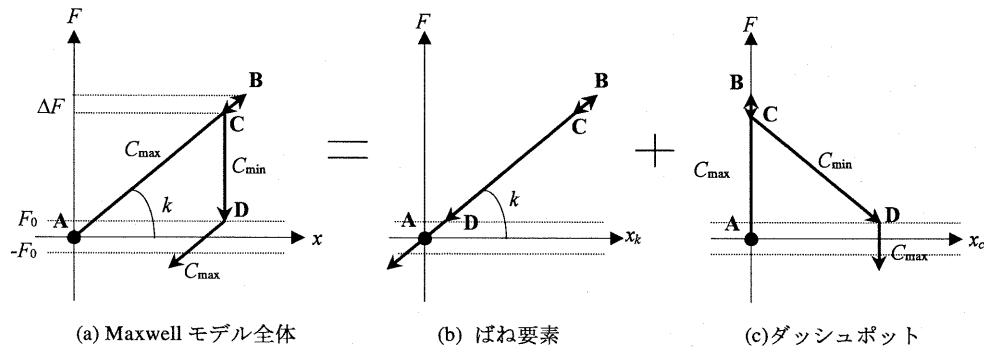


Fig.2 装置部の挙動とエネルギー吸収のプロセス
(Principle and Process of Energy Dissipation by Control Law Eq.(2))

3. エネルギー吸収効率に着目した制御則

Maxwell 型ダンパのエネルギー吸収効率を最大化するための制御則は、次の ON/OFF 型で定式化できる^{1),4)}。

$$\begin{cases} F \times \dot{x} \geq 0 \text{ or } |F| \leq F_0 : C(t) = C_{\max} \dots\dots\dots (2) \\ F \times \dot{x} < 0 \text{ and } |F| > F_0 : C(t) = C_{\min} \end{cases}$$

ここに、 F は装置荷重、 $\dot{x}$ は Maxwell モデル端部速度である。

Fig.2 は、(2) 式により制御されたセミアクティブオイルダンパ HiDAX によるエネルギー吸収の原理とプロセスを示したものである。まず、荷重と速度 (変形増分) が同符号である A~B 間では $C(t)=C_{\max}$ (弁=閉) に制御される。この時、ダンパはばねに類似した挙動を示すため変形に対応した荷重が発生し、ばね要素に歪エネルギーが蓄えられる。次に、層間速度が反転し、荷重と速度が逆符号となる C 点で $C(t)=C_{\min}$ (弁=開) に切り替えられると、ピストン-シリンダ間に相対変位 (ストローク) が発生し、ばね要素に蓄えられていた歪エネルギーが熱として吸収除荷される。荷重が閾値 F_0 以下にまで下がると、ダンパは再び $C(t)=C_{\max}$ (弁=閉) に制御され、以後同様の挙動を繰り返す。Fig.3 は、HiDAX の調和変形に対する荷重変形関係を示したものである。この平行四辺形のループ形状は (2) 式の ON/OFF 型制御則に依るものであり、振幅レベルに依らず常に相似形を保つことが特徴である。考察を簡単にするために、理想的な条件 ($C_{\min} \rightarrow 0$, $C_{\max} \rightarrow \infty$, $\Delta F = F_0 = 0$) を仮定すると、1 サイクルの吸収エネルギー量は次式となる。

$$\Delta W = 4k\delta^2 \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式を (1) 式と比較すると、(2) 式により制御されるセミアクティブオイルダンパ HiDAX は、理論上パッシブの約 2.5 ($=8/\pi$) 倍のエネルギー吸収能力を発揮できることが分かる。

この制御則を、複数のモード成分が混在する多自由度系構造物に適用した場合には問題がやや複雑になるが、特定モードが卓越する場合に限れば同様の議論が成り立つ。なお、高次モードの影響とその対応策については、文献 4 にて別途詳細な検討が行われている。

Ⅲ. ON/OFF 動作を実現するパッシブ油圧回路

(2) 式の ON/OFF 型セミアクティブ制御則に改めて注目すると、荷重増分の符号が変化する際に限って弁開度が切り替えられていることがわかる。ここで提案するオイルダンパは、内部の油圧 (荷重) の変化を利用することによって、一切の外部エネルギーを供給するこ

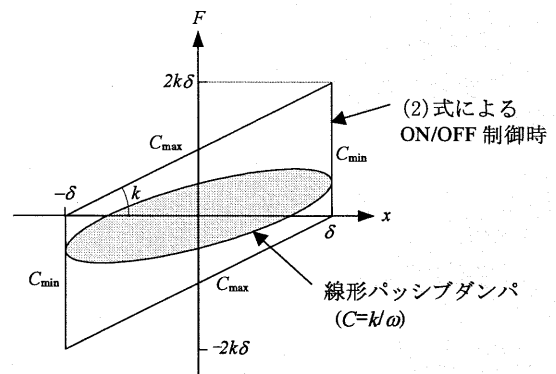


Fig.3 調和変形に対する HiDAX の荷重変形関係
(Force-Displacement Behavior of HiDAX under Sinusoidal Input)

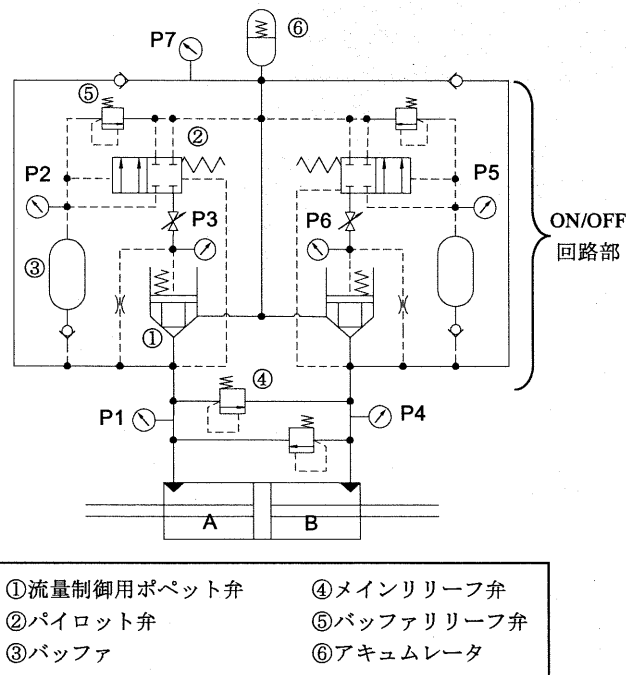


Fig.4 提案する油圧回路
(Proposed Hydraulic Circuit)

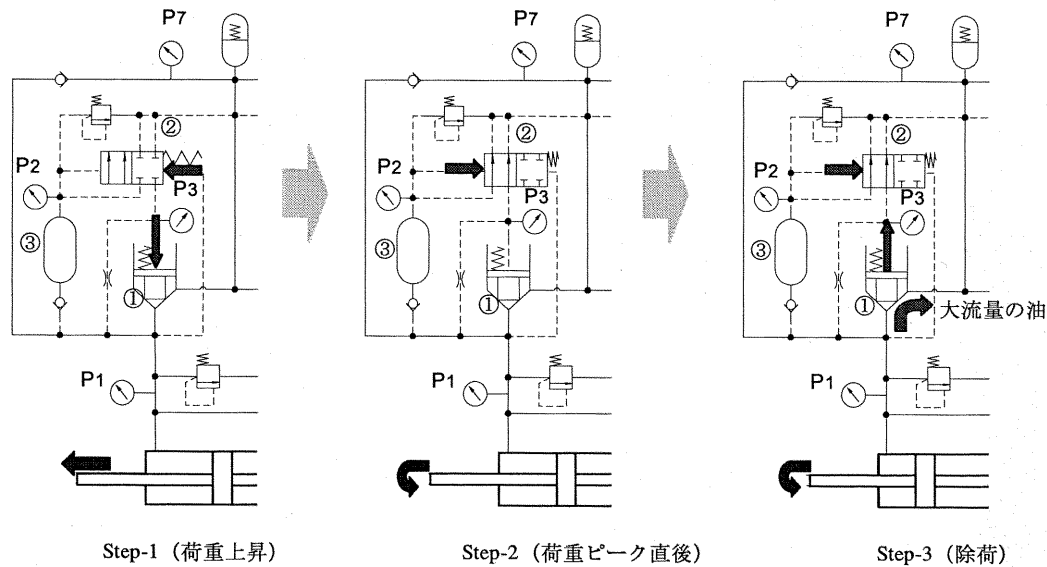


Fig.5 提案油圧回路の動作原理と弁の挙動
(Principle and Behavior of Valve System)

となく、HiDAX と類似の挙動をパッシブ作動により実現するものである。提案するダンパの油圧回路を Fig.4 に示す。流量制御のためのポペット弁①、パイロット弁②、バッファ③、リリーフ弁④、アキュムレータ⑤などから構成されており、最大の特徴はシリンダ内の二つの油圧室の圧力バランスのみに基づいてポペット弁①が開閉されることにある。

この油圧回路の動作原理を示したものが Fig.5 である。Step-1 は Fig.2 の A～B 区間に対応するものであり、ピストンの一方向（図では右から左）への移動に伴い油圧室 A の圧力 P_1 が上昇中の状態を示している。この時、パイロット弁②は前面と背面の圧力（ P_1 と P_2 ）が等しいため閉状態（ $C(t)=C_{\max}$ ）を維持する。同様に、ポペット弁①も P_1 と P_3 の圧力バランスにより閉状態を維持する。この過程で、バッファ③は P_1 に等しい圧力を内部に蓄積する。

Step-2 はピストンの移動方向が逆転した直後の状態で、Fig.2 の C 点に対応するものである。圧力 P_1 は低下し始めるが、バッファ③には B 点で発生した最大圧力が保持されるため、 P_1 と P_2 に圧力差が生じパイロット弁②の駆動が開始される。

続く Step-3 (Fig.2 の C～D 区間) では、パイロット弁の駆動に伴い P_3 が急速に除圧されるため、ポペット弁①が開いて大きな開口面積が実現し、油圧室 A 内の油が短時間に油圧室 B へ噴出する。また、これとほぼ同時にバッファ内の圧力 P_2 も除圧される（ $C(t)=C_{\min}$ ）。以上のプロセスにより油圧室 A と B の圧力差が解消する（すなわち除荷が完了する）と、圧力バランスに従ってポペット弁①とパイロット弁②が再び閉じられ $C(t)=C_{\max}$ の状態に戻る。

このように、提案油圧回路を搭載したパッシブオイルダンパは、(2) 式により制御されるセミアクティブオイルダンパ HiDAX に類似した ON/OFF 動作をパッシブ作動により実現し、大きなエネルギー吸収能力を発揮することができる。なお、Fig.4 中の⑤はバッファ圧制限用のリリーフ弁（バッファリリーフ弁）であり、装置最大荷重を制限するメインリリーフ弁④が作動している（開いている）最中はポペット弁①が開かないようにするためのものである。すなわち、

大荷重領域においてメインリリーフ弁④が作動すると、装置ストロークが増大している最中にも拘わらず若干の荷重低下（負勾配特性）が生じる場合があるが、これを除荷点と認識させないようにするために、バッファに蓄積できる圧力に上限を設けるための機構である。したがって、バッファリリーフ弁⑤はメインリリーフ弁④よりも低い荷重で作動するように設定されている。

IV. 実大試作装置の性能確認実験

1. 試作装置（試験体）の概要

実大試作装置の外観を Fig.6 に、設計仕様を Table 1 に示す。本装置のシリンダ部分は既に関連されている従来型パッシブオイルダンパ⁵⁾と同一仕様のものであり、この上部に III 章で提案した油圧回路を内蔵したバルブブロックを搭載させた。試作装置の取付長は 1.4m、質量は約 1,000kg、最大荷重は 2MN である。

2. 実験方法

Fig.7(a)に示した加力システムを利用し、アクチュエータを変位制御で駆動して試験体を動的に加力した。Fig.7(b)は加力システムの力学モデルである。ここで、加力フレームの剛性は、実構造物におけるブレース剛性に対応し、アクチュエータ変位は実構造物における層間変位に対応している¹⁾。従って実験では、層間変位に相当する波形をアクチュエータの変位指令として入力し、試験体を加力した。計測項目は、アクチュエータの変位 x と荷重 F 、装置部（試験体）変位 x_d および油圧回路内主要点の圧力 $P_1 \sim P_7$ である。

3. 正弦波加力実験

試作装置および加力システムの基本的なパラメータを同定するために、バルブブロック内の全ての弁を強制的に閉じた状態で、正弦波による予備加力実験を行った。この結果から、弁全閉時の減衰係数 $C_{\max} = 600 \text{ MNs/m}$ を得た。これは、文献 1 に示した ON/OFF 型セミアクティブオイルダンパ HiDAX の特性にほぼ等しい値であった。さらに、装置剛性は $k_d = 700 \text{ MN/m}$ 、加力フレーム剛性は $k_b = 620 \text{ MN/m}$ となった。これらより、当加力システムにおける全体剛性（両剛性

要素の直列バネ定数)は $k=(k_d^{-1}+k_b^{-1})^{-1}=330\text{MN/m}$ となる。

Fig.8 は、提案油圧回路を正常に作動させたときの試作装置の荷重変形関係を示したものである。入力波は振幅を3段階に漸増させた正弦波であり、各振幅の繰返数は3サイクルである。これを見ると、HiDAX に類似した平行四辺形の特徴的な荷重変形ループが実現されているのがわかる。なお、振動数 1.0Hz では、除荷応答遅れの影響でループ面積がやや小さいが、高層建物の 1 次振動数を想定し

た 0.3Hz では良好な荷重変形ループが確認できる。この 0.3Hz 加力時における試作装置の総エネルギー吸収量は 26.1kJNm であった。これは、同一の剛性条件下で従来型パッシブダンパが理論上発揮できる最大のエネルギー吸収量である 13.4kJNm ($C=175\text{MN/s/m}$, $k=330\text{MN/m}$ の線型 Maxwell モデルの数値解析による) の 2 倍弱となっており、セミアクティブ制御の HiDAX に迫る性能が発揮されている。

Fig.9 は、振動数 0.5Hz におけるバルブブロック内主要点の圧力変

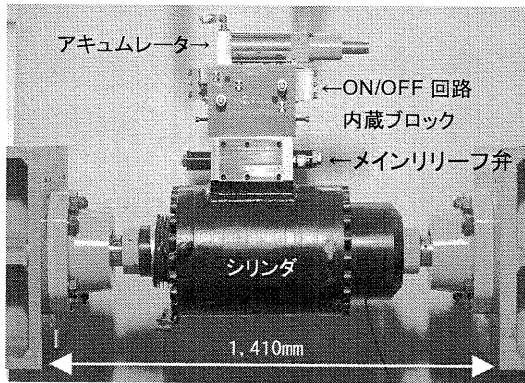


Fig.6 実大試作装置の外観
(Full-scale Prototype Device)

Table 1 実大試作装置の設計仕様
(Design Specifications of Full-scale Prototype Device)

項目	設計仕様
最大設計荷重	2.0 MN
リリーフ荷重 F_R	1.7 MN
バッファリリーフ荷重 F_{BR}	1.4 MN
最大ストローク	$\pm 60\text{ mm}$
剛性 k_d	500 MN/m
外径×取付長	$\phi 380 \times 1410\text{ mm}$
最大使用圧力	35 MPa

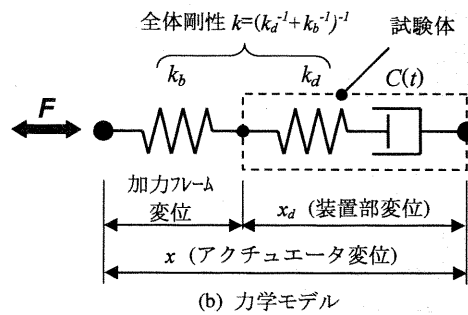
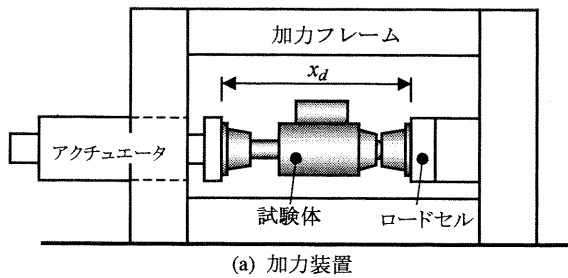


Fig.7 加力装置と力学モデル
(Experimental Setup and Mechanical Model)

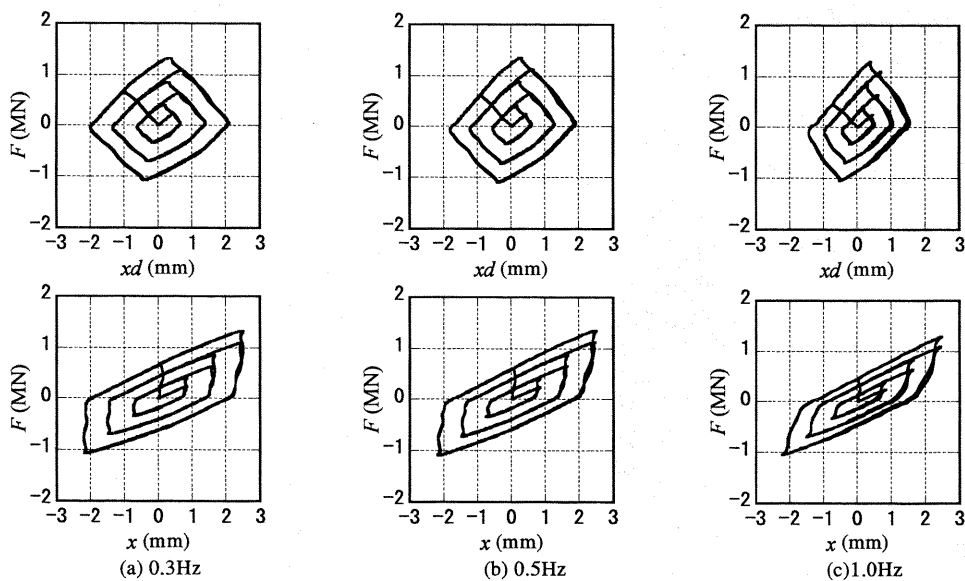


Fig.8 正弦波加力実験結果
(Sinusoidal Loading Test Results)

化を示したものである。ポペット弁の前圧 P1、バッファ圧 P2 およびポペット弁の背圧 P3 が極大値に達した後、P2 とほかの 2 点との間に僅かな差圧が生じている。その後、P3 のみが先行して急速に低下し、続いて P1 と P2 がスムーズかつ比較的短時間（約 0.1sec）に低下している。このことから、各バルブはⅢ章で述べた原理どおりに動作しているものと推察される。

Fig.10 は、リリーフ挙動を確認するために実施した大振幅正弦波加力実験の結果（0.3Hz）である。装置荷重がメインリリーフ荷重（ $F_R = 1.7\text{MN}$ ）に到達すると荷重が頭打ちになり、以後の装置荷重の上昇を抑制していることから、メインリリーフ弁の正常な作動が確認

できる。また、メインリリーフ弁作動中に、装置ストロークが単調に増大しているにもかかわらず荷重が F_R 到達後に若干低下し、荷重極大点が発生してしまう現象が見られるが、装置はこれに一切反応せず、急速除荷が回避されていることが確認できる。このことから、バッファリリーフ弁が意図どおりに作動し、バッファリリーフ荷重 $F_{BR} = 1.4\text{MN}$ を上回る荷重領域での急速除荷の発生を抑制している（すなわちポペット弁は開かず、Fig.4 の ON/OFF 回路部は閉状態を保ち続けている）ことが推察できる。

4. 地震応答波加力実験

ランダムな加力条件に対する提案油圧回路の挙動および動作安定性を確認するために、1 次振動数 0.3Hz の 30 階建て建物モデルに EL CENTRO NS 波（最大速度を 25cm/s に基準化）を入力した時の 1 階の応答層間変位波形を用いた地震応答波加力実験を行った。Fig.11 には、アクチュエータ変位 x 、荷重 F 、吸収エネルギー量 ΔW の時刻歴および荷重変形関係を示した。図より、正弦波加力実験の結

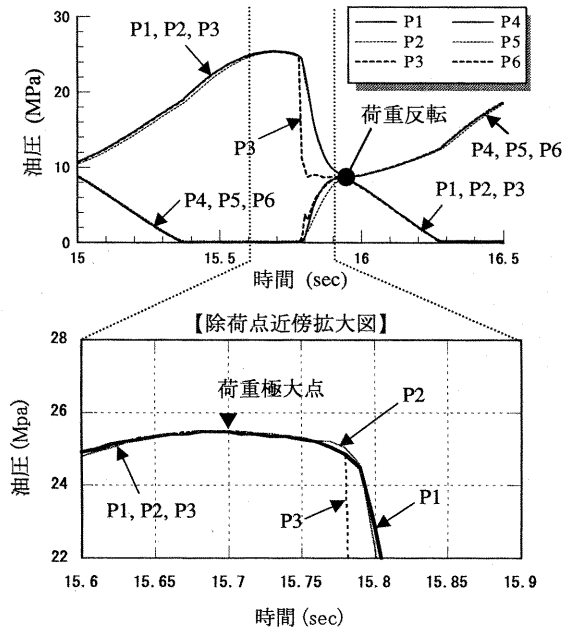


Fig.9 油圧回路内主要点の圧力変化(0.5Hz)
(Time History of Pressure in Hydraulic Circuit)

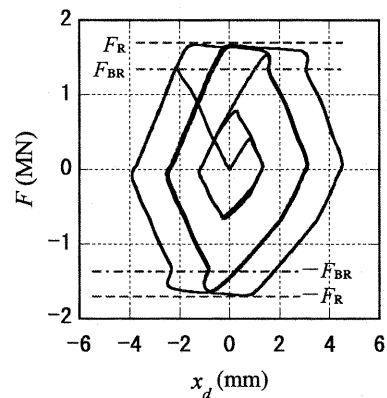


Fig.10 大振幅正弦波加力実験結果 (0.3Hz)
(Force-Displacement Relation for Large Amplitude)

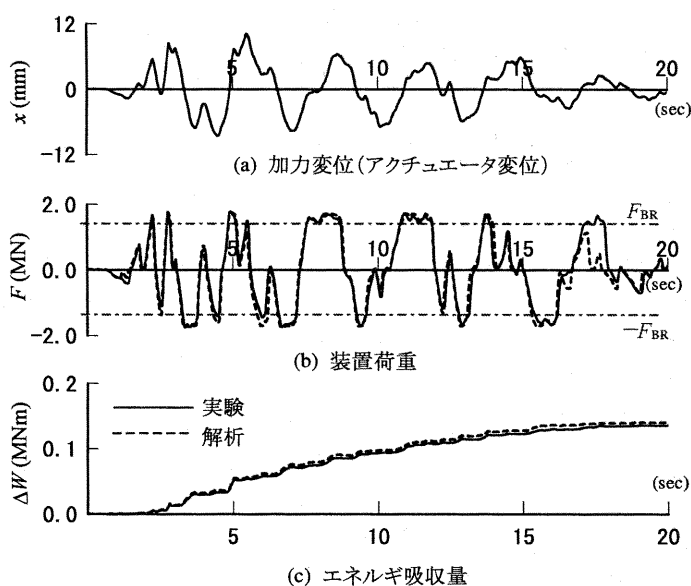
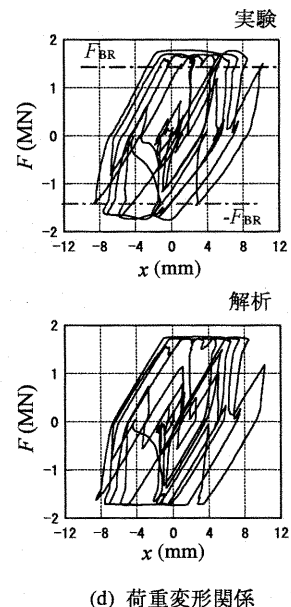


Fig.11 地震応答波加力実験結果およびシミュレーション解析
(Test Results and Simulations for Structural Seismic Response Wave)



果と同様に、変位の極大点で荷重が急速に除荷されること、またパッファリリーフ荷重 F_{BR} 以上の荷重領域で急速除荷が回避されていることが確認できる。図中には、III章に示した制御則を組み込んだ装置解析モデルによるシミュレーション結果も併せて示した。解析に用いたパラメータは以下のとおりである。

$$k=(k_a^{-1}+k_b^{-1})^{-1}=330 \text{ MN/m}$$

$$\Delta F (\text{Fig.2 参照}) = 20 \text{ kN}$$

$$F_0 (\text{Fig.2 参照}) = 50 \text{ kN}$$

$$C_{\max} = 600 \text{ MNs/m}$$

$C_{\min}$: 次式により発生荷重 F を直接定義

$$F = \alpha \dot{x}_c + \beta \dot{x}_c^2 \quad (\alpha=5 \text{ MNs/m}, \beta=0.2 \text{ MN(s/m)}^2, \dot{x}_c : \text{Fig.1 参照})$$

これを見ると両者は極めて良く一致しており、簡単な解析モデルで当装置の挙動を高精度に追跡できることがわかった。

5. 繰返し作動試験

当装置の動作安定性を確認するために、荷重振幅 $\pm 300 \text{ kN}$ 、振動数 0.5 Hz で約 5 万サイクルの正弦波繰返し加力を行い、繰返し加力前後での同一加力波形入力時の特性変化を調べた。この結果、ループ形状およびエネルギー吸収量に特段の変化は無く、多数回の繰返しに対しても、提案した油圧回路は安定した特性を発揮することが確認されている。

V. まとめ

ダンパ内部の油圧変動のみを利用して流量制御弁（ボペット弁）を自動的に開閉させることにより、外部エネルギーを一切供給することなく ON/OFF 型セミアクティブオイルダンパ HiDAX と同様の挙動をする全く新しいパッシブオイルダンパを提案した。当装置の性能を確認するために、考案した油圧回路ブロックを登載した実大の試作装置を製作し動的加力実験を行った。実験の結果、当装置は

HiDAX に類似した荷重変形特性を示し、従来型パッシブオイルダンパを大きく上回るエネルギー吸収能力を発揮することが確認された。今後は、同定された装置解析モデルを用いて、種々の建物に設置した時の応答低減効果について検討を行っていく予定である。

なお、今回の実験は比較的高い荷重領域（装置最大荷重の 10% 以上）での動作および性能確認を主目的に実施したものである。風揺れなどを対象とした低荷重領域（特に装置最大荷重の 5% 以下）で確実な動作を得るためには、何らかの追加的措置が必要となることもわかっており、今後の検討課題としたい。

謝 辞

当試作装置の製作および実験実施に際し、日立機材㈱および豊興工業㈱より多大な協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 栗野治彦, 田上淳, 清水幹; エネルギー吸収能力最大化を目的としたセミアクティブオイルダンパ, 第 2 回制震 (振) シンポジウム, (2000), pp77-84.
- 2) 諏訪政雄, 栗野治彦, 田上淳ほか; 減衰係数切替え型セミアクティブダンパを適用した中層建物の振動実験 (その 1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2001), No.21131-21133.
- 3) 大類哲, 清水幹ほか; アクティブ二重動吸振器とセミアクティブオイルダンパを併用した超高層建物の振動実験 (その 1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2003), No.21320-21321.
- 4) 栗野治彦; ON/OFF 型セミアクティブダンパの分散型制御手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, (2003), pp.79-86.
- 5) 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, 日本機械学会 第 5 回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, (1997), pp.370-373.