

高性能複合型制震装置の開発

—— Y-Oダンパーの性能確認実験および制震効果の検討 ——

佐野 剛志 高橋 泰彦
鈴木 哲夫

Development of Hybrid Damping System for Seismic Vibration Control

—— Performance Test and Vibration Control Effect Study on Y-O Damper ——

Takeshi Sano Yasuhiko Takahashi
Tetsuo Suzuki

Abstract

Vibration control technologies are being applied in building structures using viscous or elasto-plastic dampers. High performance viscous dampers such as oil dampers having a high coefficient of viscous damping are effective for vibration control. However, it is necessary to take countermeasures against the large reaction viscous damping force on the structure during large seismic motions; reinforcement of the structure and a brace or relief valve for controlling damping force. With elasto-plastic dampers, the control performance is low during small seismic motions, and the stresses or plastic deformations of the structure remain under large seismic motions. To solve these problems, this paper proposes a hybrid high performance damping system (Y-O damper) by arranging a viscous damper and an elasto-plastic damper in series, to handle structural vibrations caused by small to large seismic motions, and it describes a performance test and the vibration control effect.

概要

近年、架構内に粘性あるいは弾塑性ダンパーを設け、構造物の揺れを制御する技術が数多く見られる。オイルダンパー等の粘性ダンパーによって制震効果を高めるには高い粘性減衰係数を有する高減衰力ダンパーを設けることが効果的であるが、大地震時にダンパーから架構に伝達される高減衰力に対応すべく主架構や取り付けブレースに補強を施したり、リリース弁で減衰力を制限するなど複雑な配慮を要する。一方、弾塑性ダンパーによる制震では、塑性化による振動エネルギー吸収が始まるまでの比較的小さな地震動などに対して制震効果が少ないこと、大地震終了時に架構とダンパーに変形や応力が残留する可能性があること等の課題がある。以上の課題を解決すべく、粘性ダンパーと弾塑性ダンパーを直列に配し、小地震動から大地震動まで対応可能な高性能複合型制震装置Y-Oダンパーを提案し、性能確認実験と制震効果の検討を行った。

1. はじめに

阪神大震災以降、建物の架構（柱と梁に囲まれたフレーム）内に粘性ダンパーや弾塑性ダンパーを設置して、地震動や強風などの外乱に対する構造物の挙動を制御する架構内制震技術の研究や適用事例が数多く見られるようになった。粘性ダンパーの中でも鋼製の円筒シリンダー内部に封入したオイルがオリフィスを通る際に生じる圧力差で減衰力を発生するオイルダンパーは建物の層間変形速度に比例する減衰力を発生するように設計されたもので比較的小さな地震動から振動制御効果を発揮するものである。粘性タイプのダンパーを用いて制震効果を高めるためには粘性減衰係数を大きくすることが効果的であるが大地震時にはダンパーが発生する減衰力が非常に大きくなるため、架構側に補強を施したり、リリース弁によって発生減衰力に上限を設ける等の配慮

が必要となる。一般的に建物は高さ方向で架構の断面性能が異なるため、建物にとって最適な減衰を付与することを考えた場合、リリース弁の種類が架構の性能に応じて多くなったり、高荷重で作動するリリース弁の作動確認を行う動的加振実験が必要になるなどダンパー1個当たりの製造コストが高くなる可能性がある。

一方、弾塑性ダンパーによる制震架構は、通常、震度4～5以上の地震動に対して安価で高い制震効果が期待できるが、ダンパーが塑性化し振動エネルギーを吸収するまでの比較的小さな地震動や強風に対して制震効果が得られないこと、大地震終了時に架構とダンパーの双方に変形や応力が残留する可能性があること等の課題が残されている。

これらオイルダンパーと弾塑性ダンパーの有する課題を解決するため、比較的安価で小地震動や強風から大地震動まで制震効果を発揮することを目標に弾塑性・オイ

ル複合ダンパー（以下Y-Oダンパーと称する）を開発した。Y-OダンパーはY形ブレース・ダンパーおよび摩擦などを含む降伏（Yeilding）機構とオイルダンパーを複合したことに由来する。

2. Y-Oダンパーの構成と制震概念

Y-OダンパーはFig. 1に示すように架構内に粘性ダンパー（オイルダンパーなど）と弾塑性ダンパー（極低降伏点鋼ダンパーや摩擦ダンパーなど）を直列に配置した高性能複合型制震装置である。ブレース、粘性ダンパーおよび弾塑性ダンパーの組み合わせ方は架構の性能や建物の用途に応じて幾つかのバリエーションの中から選択することが可能である。

Fig. 2にY-Oダンパーの制震概念を示す。小地震動や強風などによる小振幅の揺れには粘性ダンパーのみが作動し、弾塑性ダンパーは弾性範囲内に止まる。大地震動に伴う大振幅の揺れでは建物の応答層間変形速度も大きくなる。粘性減衰力が弾塑性ダンパーに予め設定した耐力に達すると弾塑性ダンパーも塑性化に伴う震動エネルギーを行う。弾塑性ダンパーは同時に過大な減衰力を抑制する安全装置として働く。

3. オイルダンパーの性能確認実験

3.1 オイルダンパーの仕様

Y-Oダンパーの構成部材の一つである高減衰力オイルダンパーを試作し性能確認実験を行った。オイルダンパーは建物への単独使用も念頭に置きFig. 3の減衰力計画線（実線）に示すように減衰力の上限が800kNとなるようリリーフ弁を設定し、低速領域の粘性減衰係数は500kN・sec/cmとした。Table 1にオイルダンパーの設計仕様を示す。Fig. 4にオイルダンパーの寸法をFig. 5に油圧回路図を示す。本ダンパーは単筒式でピストン、シリンダー、ロッド、アキュムレータ、調圧弁、リリーフ弁、温度補償やエア抜きおよび微小振幅時の減衰力調整のためのオリフィスとチェック弁等で構成されている。

3.2 実験概要

オイルダンパーのが所期の設計性能を満足することを確認するため動的アクチュエータによる正弦波加振実験

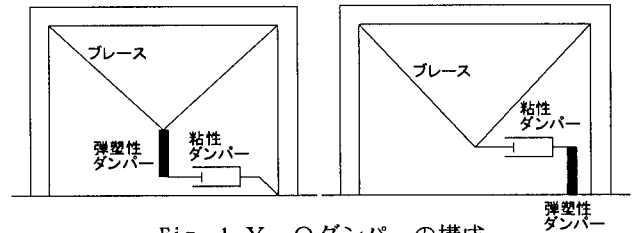


Fig. 1 Y-Oダンパーの構成
Construction of Y-O Damper

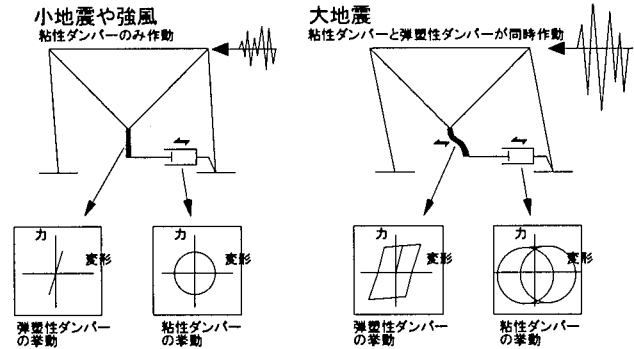


Fig. 2 Y-Oダンパーの制震概念
General Concept of Y-O Damper

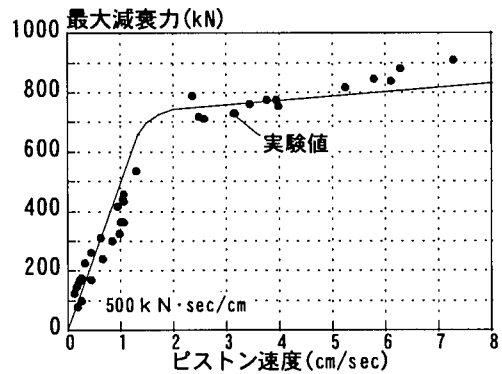


Fig. 3 オイルダンパーの減衰力計画線
Designed Damping Characteristics

Table 1 オイルダンパーの設計仕様
Specifications of the Oil Damper

項目	仕様
寸法	シリンダー外径285φ×長さ1,710mm
ストローク	±70mm
最大荷重	1000kN
減衰係数	リリーフ荷重まで 500kN・sec/cm

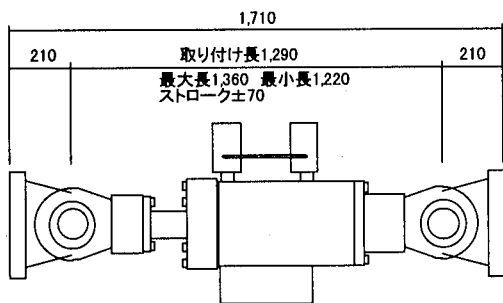


Fig. 4 オイルダンパーの形状
Size of the Oil Damper

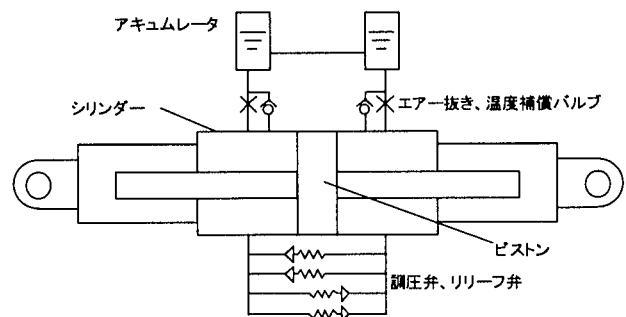


Fig. 5 オイルダンパー油圧回路図
Mechanism of the Oil Damper

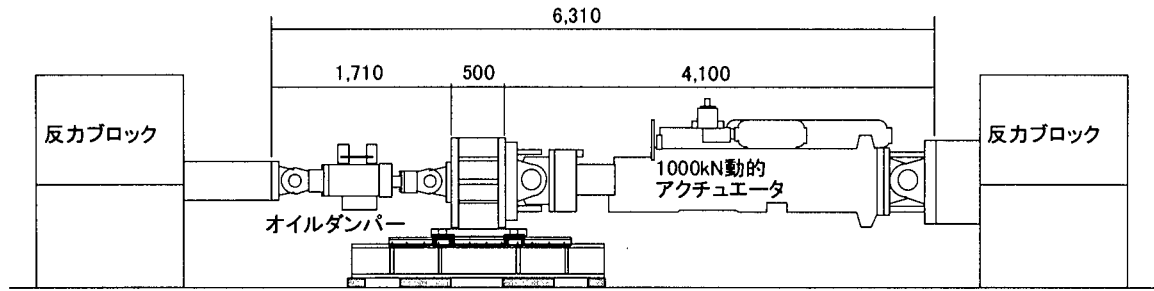


Fig. 6 加振装置
Dynamic Loading System

を行った。実験はFig. 6に示すように1,000kN動的アクチュエータとオイルダンパーをリニアガイド（スライド機構）を介して接続する試験装置を用いて行った。加振は周期0.8sec~6.0sec, 変位振幅2mm~50mmの範囲で約40ケースの正弦波で行った。なお, 1ケース当たりの加振時間は60sec~120secである。実験結果を以下に示す。

3.3 減衰カーピストン変形関係

減衰カー変形関係のうち代表的な2ケースをFig. 7, Fig. 8に示す。ピストン速度が小さい小振幅時 (Fig. 7) には減衰カーピストン変形関係は弾性勾配を含む楕円形を描いている。ピストン速度が大きい大振幅時 (Fig. 8) にはリリーフ弁が作動し800kNで減衰力が制限されることを確認した。また他の全てのケースについても同様な安定したループ特性を示すことを確認した。

3.4 最大減衰カー最大ピストン速度関係

Fig. 3に全加振実験より得られた最大減衰力と最大ピストン速度の関係を併記した。最大速度は加振正弦波の変位振幅と周期より求めたものである。減衰力計画線と比較しダンパーが所期の性能を有することを確認した。

3.4 オイルダンパーの力学モデル

オイルダンパーがダッシュポットのみで表現できる場合, 減衰カー変形関係は弾性勾配を含まない楕円形を描く。しかし実際にはFig. 7やFig. 8に示すように封入したオイルの量やオイルの弾性剛性, 構成部品 (ピストンやシリンダー) の弾性剛性に起因し弾性勾配を含む楕円形の減衰カー変形関係となるため制震デバイスとして用いるには, 地震応答解析に適した力学モデルに置き換える必要がある。この力学特性をFig. 9に示すバネとダッシュポットを直列に繋いだマックスウェル型モデルで表現出来ると仮定する¹⁾。マックスウェル型モデルではバネとダッシュポットは等しい力Pを受けるのでモデルに生じる総変位を δ , バネに生じる変位を δ_1 , ダッシュポットに生じる変位を δ_2 とすると

$$\delta_1 = P/K \quad \dots\dots (1)$$

$$\delta_2 = P/C \text{ すなわち } \delta_2 = \int (P/C) dt \quad \dots\dots (2)$$

$\delta = \delta_1 + \delta_2$ よりモデルの挙動を表す方程式は

$$\delta = P/K + \int_0^t (P/C) dt \quad \dots\dots (3)$$

モデルに作用する力Pを

$$P = K\delta_0 \sin \omega t \quad \dots\dots (4)$$

と仮定し(3)式に代入すると

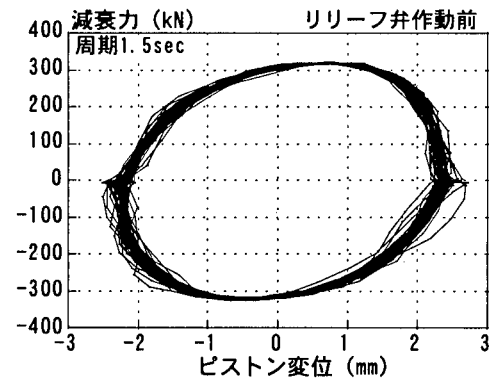


Fig. 7 減衰カーピストン変形関係
Load vs. Piston Stroke

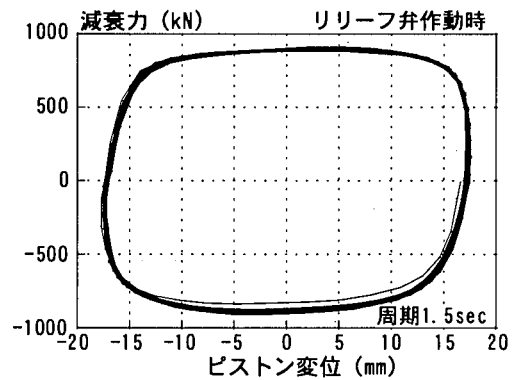


Fig. 8 減衰カーピストン変形関係
Load vs. Piston Stroke

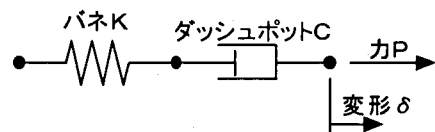


Fig. 9 マックスウェル型モデル
Maxwell Model

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_0 \left[\sin \omega t + \frac{K}{C\omega} (1 - \cos \omega t) \right] \\ &= \delta_0 \sqrt{1 + \left(\frac{K}{C\omega} \right)^2} \sin(\omega t + \alpha) + \frac{\delta_0 K}{C\omega} \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで $\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{K}{C\omega} \right)^2}}$

したがってバネ定数Kは荷重振幅 P_{max} と変位振幅 δ_{max} , 力と変位の位相差 α を用いて次式で表すことができる。

$$K = \frac{K\delta_0}{\delta_0 \sqrt{1 + \left(\frac{K}{C\omega}\right)^2}} = \frac{P_{\max}}{\delta_{\max} \cos \alpha} \dots (6)$$

(4), (5)式から ωt を消去し楕円の面積を算定すると
 $\Delta S = \pi(K/C\omega) \cdot K\delta_0^2 \dots (7)$
 となる。よってダッシュポットの粘性減衰係数Cは

$$C = \frac{\pi(K\delta_0)^2}{\omega \Delta S} = \frac{\pi P_{\max}^2}{\omega \Delta W} \dots (8)$$

と表すことができる。ここで ΔW は1サイクルの吸収エネルギー量である。

(6)式を用いてオイルダンパーのバネ定数Kを求めると、約5,500kN/cmととなる。また(8)式を用いて粘性減衰係数Cを求めるとおおむね設計通りの約500kN·sec/cmととなる。

3.5 油温上昇と減衰特性

雰囲気温度20℃, シリンダー外部温度20℃, 加振休止時間約90secで15ケースの加振を断続的に実施した時点(休止時間を含む総加振時間約50分)でシリンダーの外部温度は約50℃上昇したが減衰特性(ループ形状やバネ定数, 粘性減衰係数)に有意な変化を確認することはできなかった。実地震の継続時間は数十秒であるので地震時の油温上昇は非常に小さいといえる。継続時間の長い台風などによる外乱でも本加振実験のような大きな変位振幅が強制されることは制震建物ではほとんどない。

4. Y-Oダンパー付きフレームの加振実験

4.1 Y-Oダンパーの概要と実験用フレーム

Fig. 10に示すように実験付き鉄骨フレームにY-Oダンパーを組み加振実験を行った。Photo 1に実験状況を示す。オイルダンパーに組合わせる弾塑性ダンパーの形状とせん断パネル部の鋼材の強度試験結果をFig. 11に示す。弾塑性ダンパーの最大耐力は弾塑性ダンパーによる最大減衰力制御性状を確認すべくオイルダンパーのリリーフ弁作動荷重を下回る約600kNとした。加振波形はFig. 12に示す周期4.5秒で振幅の異なる正弦波を組合せたもので、最大振幅±10mmから±50mmまで加振した。

4.2 実験結果

Fig. 13, Fig. 14にY-Oダンパー付き実験フレームの荷重-変形関係を示す。小振幅時は、オイルダンパーのみがエネルギー吸収し、荷重-変形関係は楕円形となっている。変位振幅が大きくなりY-Oダンパーの発生減衰力が弾塑性ダンパーの最大耐力に達すると、弾塑性ダンパーが塑性変形しエネルギー吸収を開始する。また同時に過大減衰力を制御する役割も果たしている。Fig. 15, Fig. 16に大振幅時の荷重-弾塑性ダンパー変形関係と荷重-オイルダンパー変形関係を示す。弾塑性ダンパーの変形はブレースと実験用鉄骨フレームの弾性変形を含んでいる。Fig. 15より荷重が小さい範囲では、弾塑性ダンパーは線形範囲で、荷重が大きくなると塑性化

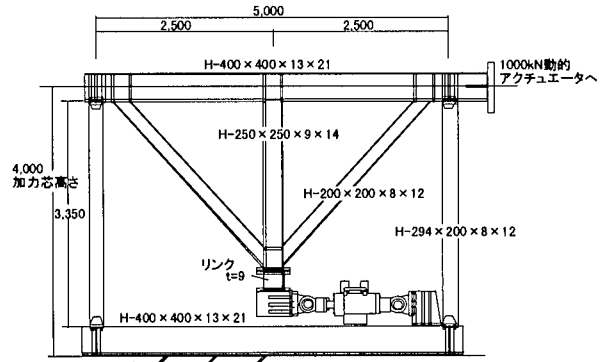


Fig. 10 実験用フレーム Testing Frame

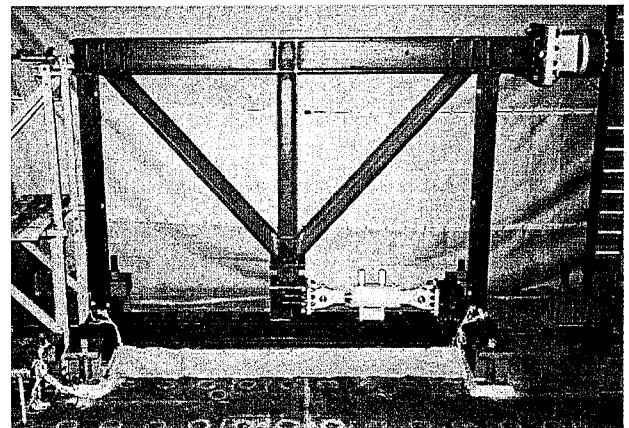


Photo 1 実験風景 General View of Testing Frame

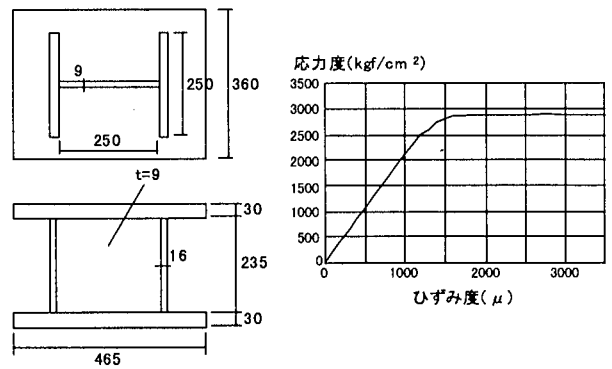


Fig. 11 せん断パネルの形状と材料強度 Shape and Characteristic of Plastic Damper

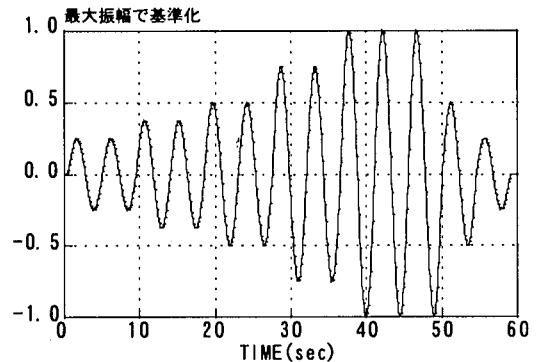


Fig. 12 加振波形 Loading Schedule

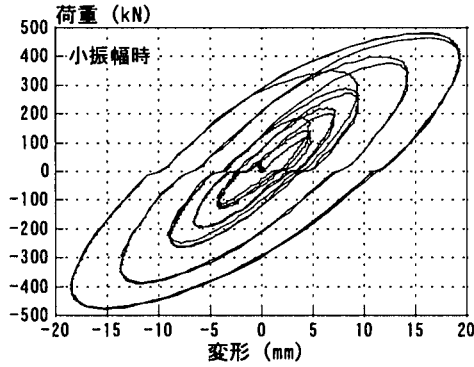


Fig. 13 荷重-変形関係
Load vs. Displacement

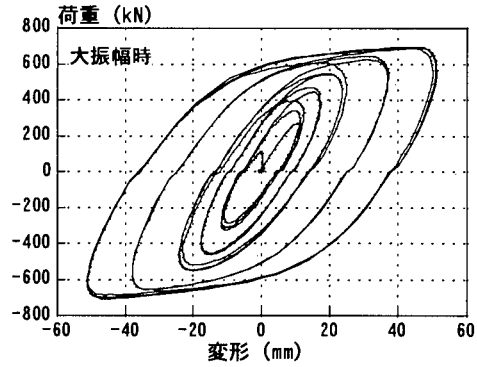


Fig. 14 荷重-変形関係
Load vs. Displacement

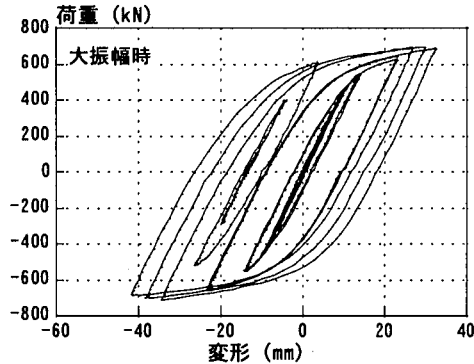


Fig. 15 荷重-弾塑性ダンパー変形関係
Load vs. Displacement of Plastic Damper

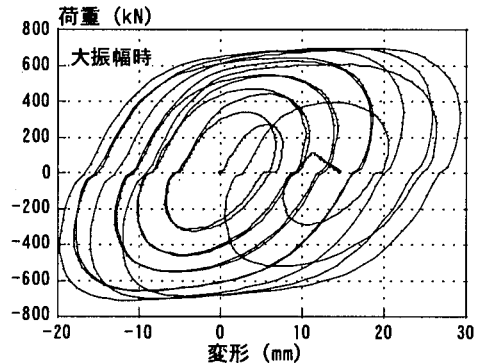


Fig. 16 荷重-オイルダンパー変形関係
Load vs. Displacement of Oil Damper

に伴うエネルギー吸収をしていることがわかる。Fig. 16よりオイルダンパーは弾塑性ダンパーが塑性変形しているとき、一定の荷重(すなわち一定の速度)を維持して変形することがわかる。

以上の実験結果より、Y-Oダンパーは小振幅時にはオイルダンパーのみが働き、大振幅時にはオイルダンパーと弾塑性ダンパーが同時に働き、過大減衰力の発生を抑えることが確認した。

5. 地震応答解析による制震効果の確認

5.1 制震対象解析モデル

地震応答計算による制震効果の検討を行った。解析モデルは、13階建て鉄骨造事務所建築物(各階床面積が約1,000m²)を想定し、Fig. 17に示す13質点等価せん断型モデルを用いて行った。モデルの弾性1次固有周期は2.13sec、主架構の等価せん断バネはBi-Linear型(初期剛性Kf, 降伏荷重Qfy)とした。建物固有の減衰は主架構の初期剛性Kfに比例する形で2%とした。

5.2 Y-Oダンパーのモデル化

Y-Oダンパーを構成するオイルダンパーの粘性減衰係数Cdは、現在建築物に用いられている中で最大級の粘性減衰係数を有するオイルダンパー約4台分に相当する値(1台500kN・sec/cm×4台程度)とした。組み合わせる弾塑性ダンパーの初期剛性(Kd)および降伏荷重(Qdy)は実建築物に用いられる一般的な弾塑性ダンパー約4台分に相当する値とした。なお3章のオイルダンパーの性能確認実験で述べたオイルダンパーが有するバネ定数K_o

架構の諸元		ダンパーの諸元			
Kf	Qfy	W	Kd	Qdy	Cd
(tf/cm)	(tf)	(tf)	(tf/cm)	(tf)	(tf・s/cm)
		1650			
450	800		175	150	160
		850			
450	1100		200	200	160
		850			
450	1300		250	250	180
		850			
450	1450		250	250	180
		850			
500	1600		300	300	180
		850			
550	1700		350	350	180
		850			
550	1800		350	350	180
		850			
600	1900		400	350	180
		850			
650	2000		450	450	200
		850			
700	2100		500	450	200
		850			
700	2150		500	450	200
		850			
750	2250		500	450	200
		850			
900	2400		400	450	200

Fig. 17 応答解析用建物モデル
Model for Seismic Response Analysis

はFig. 18に示すように弾塑性ダンパーやブレースのモデルに直列結合する形で考慮した。オイルダンパーが含むバネ定数K_oがブレースや弾塑性ダンパーの剛性(K_b, K_p)と比較し十分大きい場合は、おおむねK_b, K_pの値でK_dを決めることが可能である。

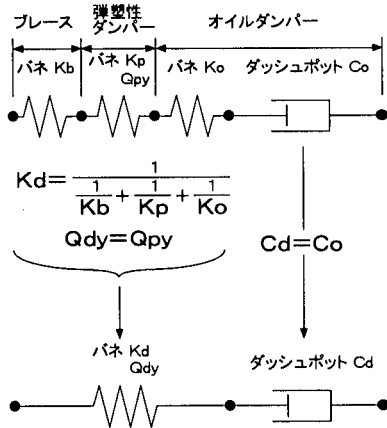


Fig. 18 Y-Oダンパーのモデル化
Modeling of Y-O Damper

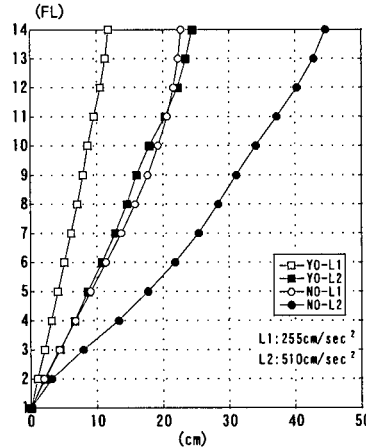


Fig. 19 最大応答変位
Maximum Response Displacement

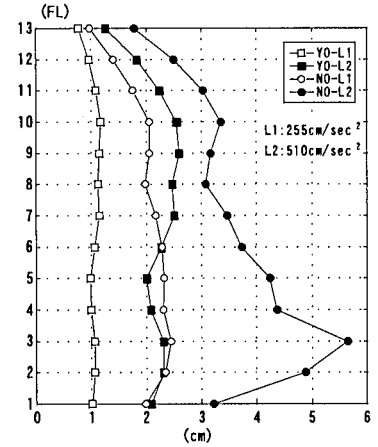


Fig. 20 最大応答層間変位
Maximum Response Story Drift

5.3 入力地震動と解析ケース

応答解析に用いた入力地震波は、代表的な地震波の一つであるEl-Centro40NS波で最大入力加速度25cm/sec, 50cm/sec相当の255cm/sec²および510cm/sec²とした。解析はY-Oダンパーを有する制震モデルと非制震モデルの2ケースで行った。

5.4 応答解析結果

各階の最大応答変位と最大応答層間変位をFig. 19, Fig. 20に示す。制震モデル(YOモデル)では入力レベルに関わらず、非制震モデル(NOモデル)と比較し最大応答変位と最大応答層間変位が、おおむね2/3に減少した。Fig. 21に最大入力加速度510cm/sec²時のY-Oダンパーの発生減衰力と層間変位の関係を示す。4章で示した実験結果と同様にダンパーの最大発生減衰力は弾塑性ダンパーの降伏荷重(Qdy=450tf)で制御され過大な減衰力が主架構に伝達されるのを防止している。

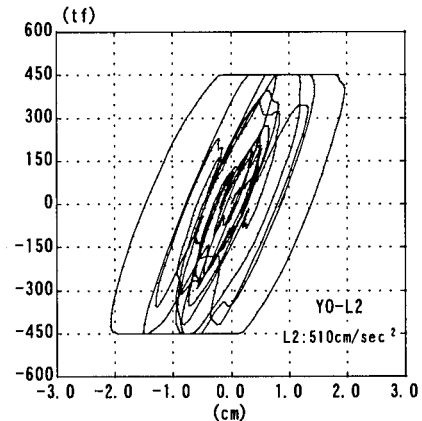


Fig. 21 減衰力-変形関係(4階)
Damping Force vs. Story Drift

6. まとめ

オイルダンパー単体性能確認、Y-Oダンパー付きフレームの性能確認とY-Oダンパーの力学モデルや制震効果について検討し以下のことを確認した。

- ① オイルダンパーは低速領域、リリース領域とも設計減衰力計画線と同等の減衰性能を有する。
- ② Y-Oダンパーは小振幅から大振幅まで過大な減衰力を制御すると同時に効率よくエネルギー吸収する。
- ③ Y-Oダンパー付き制震建物は中小地震や大地震に伴う建物の揺れをおおむね2/3に低減する。

Y-Oダンパーは減衰力制御が容易なためシステムとしての装置の簡素化、低価格化および大架構対応超高減衰力装置としての適用が期待できる。なおY-OダンパーはPhoto 2のように既に実建物へ適用されている。

参考文献

1) 大崎 順彦：振動理論，建築構造学大系24，彰国社，p. 226～228，(1980)

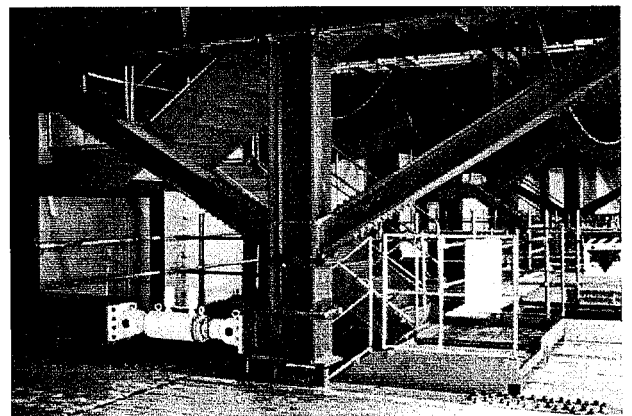


Photo 2 実建物への適用
Application for Real Structure

2) 佐野：Maxwell型ハイブリッド粘弾塑性ダンパーによる制震効果に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集B-2，p. 831～832，(1996.9)

3) 佐野，高橋：Maxwell型ハイブリッド粘弾塑性ダンパーによる制震効果に関する検討(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集B-2，p. 857～858，(1997.9)

4) 佐野，鈴木：弾塑性・オイル複合ダンパー(Y-Oダンパー)の性能確認実験および実建物への適用，D&D'97シンポジウム「21世紀のダンピング技術」講演論文集，日本機械学会，p. 137～140，(1997.7)