高減衰オイルダンパーの実大性能実験

A REAL SCALE PERFORMANCE TEST OF A HIGH CAPACITY OIL DAMPER

嶺脇重雄 — * 1 山本雅史 — * 2
曾根孝行 — * 3 中 原 学 — * 4
露木保男 — * 5

Shigeo MINEWAKI — * 1 Masashi YAMAMOTO — * 2
Takayuki SONE — * 3 Manabu NAKAHARA — * 4
Yasuo TSUYUKI — * 5

キーワード：
オイルダンパー, 実大実験, 高減衰, 製品試験方法

Keywords:
Oil damper, Real scale test, High capacity in damping, Product test method

The authors developed an oil damper with a new and novel configuration. That has the high damping capacity, 6000kN force in maximum. Through a real scale performance test with conditions of velocity of 450mm/s or of displacement amplitude of 184mm both in maximum, it was confirmed the developed damper possesses the designed characteristics. In another test using earthquake responded waves, the device showed an expected performance, as well. It was also found out that a new test method, employing the feature on the configuration consisted of three element dampers, and will make product testing possible, was precise enough.

1. はじめに

建物の耐震安全性向上のために制振用ダンパーを用いる事例は十数年来増加の傾向を維持しており¹⁾、高層建物では一般的な技術と言える。中でも近年の、建物の巨大化、極大地震動に対する余裕度の確保、ダンパー設置個所が限定されることを反映した集約化への要望などを考慮すると、制振用ダンパーの高容量化が求められるのは必然と言える。また、2011年東北地方太平洋沖地震の際に東京都内の高層建物で生じた継続時間の長い揺れやそれに伴って生じた仕器の移動・転倒、ドア開閉の障害など²⁾に対する対策の要請に応えることを併せて考え、筆者らは、中小地震から有効な減衰効果を発揮する特性をもつオイルダンパーの高容量化を開発対象とした。

本論では開発品の実大性能実験結果について報告する。

2. 高減衰オイルダンパー

筆者らが考案した高減衰オイルダンパーの構成概念図(断面)を図1に示す。要素ダンパー3基を材軸方向に積層し、共通のピストンロッドで稼働させることで3倍の減衰力を得ることができる³⁾。最大減衰力の目標値は6000kNとした。この値は、合理的な構造部材サイズとの関連においてダンパー減衰力を定めるべきであることや、ダンパー製造、部品調達の容易さなどを勘案したものである。

3. 実験計画

3.1 試験体

上記概念に基づき設計した最大減衰力 6000kN の高減衰オイルダンパーを対象とする。減衰特性はバイリニア型である。設計諸元を

図1 高減衰オイルダンパー構成概念図

表1 試験体設計諸元

項目	単位	数値	項目	単位	数値
全長(中立時)	mm	4250	ストローク	mm	±200
本体最外径	mm	530	ダンパー剛性 K	kN/mm	900
一次減衰係数 $C1$	kN/(mm/s)	225	二次減衰係数 $C2$	kN/(mm/s)	2.80
リリース速度 V_r	mm/s	21.33	リリース荷重 F_r	kN	4800
最大速度 V_{lim}	mm/s	450	最大減衰力 F_{lim}	kN	6000

表2 試験機性能諸元(長軸方向)

項目	単位	定格値
最大荷重	kN	8900
最大変位	mm	±1220
最大速度	mm/s	±1778

表1に示す。ストロークは同一の基本設計で製作可能な最大値とした。図1中に示すように3基共用のアクキュレータをピストンロッドに内蔵する。試験体姿図を図2中に示す。

3.2 実験施設

米国 University of California San Diego 校が所有する大規模動的加力実験施設⁴⁾を用いた。加振方向は試験機の長軸方向である。表2に試験機性能諸元を、写真1に取付状況を示す。主要計測点模式図を図2

¹⁾ ㈱竹中工務店技術研究所振動制御グループ 主任研究員・博士(工学)
(〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)

²⁾ ㈱竹中工務店技術研究所地震工学部 部長・博士(工学)

³⁾ ㈱竹中工務店技術研究所振動制御グループ 研究主任

⁴⁾ カヤバシステムマシナリー(㈱)生産統轄部 技術専任課長

⁵⁾ カヤバシステムマシナリー(㈱) 専務取締役

¹⁾ Chief Researcher, Structural Dynamics Group, Research & Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

²⁾ General Manager, Earthquake Engineering Department, Research & Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

³⁾ Assoc. Chief Researcher, Structural Dynamics Group, Research & Development Institute, Takenaka Corporation

⁴⁾ Engineering Staff Manager, Production Headquarters, Kayaba System Machinery

⁵⁾ Executive Managing Director, Kayaba System Machinery

に、一覧を表 3 に示す。変位はダンパー伸長方向を正とした。試験体に発生する減衰力は各油室の圧力測定値より求めた。

3.3 実験項目

- 実験項目およびそれぞれの目的を以下に述べる。
- 1) 減衰性能確認実験：正弦波加振により所定の数値減衰力関係が実現されていることを確認する。
 - 2) 部分バイパス実験：製作メーカーが保有する容量 2000kN 程度の試験機によって製品出荷試験を可能とするロジックを確認する。
 - 3) ランダム波加振実験：建物の地震応答波形を模擬したランダム波に対しても、所定の減衰性能が発現されることを確認する。
 - 4) 多数回繰り返し実験：温度上昇が顕著に現れる状態まで加振を繰り返し、ダンパーの熱容量と温度上昇量の関係を確認する。

3.4 実験条件

- 1) 減衰性能確認実験：本開発ダンパーの適用対象として考えられる超高層建物の、i) 1 次振動数となり得る領域、ii) 速度応答が卓越する可能性のある振動数領域、iii) 副次的な影響を与える可能性のある振動数領域一を想定した 3 振動数水準において速度減衰力関係を確認する。それぞれを代表する水準として 0.2Hz、1.0Hz、1.6Hz を与える。上の各水準に対して、f) V_r をやや下回るダンパー速度、g) V_r をやや上回るダンパー速度、h) 最大速度付近一の 3 速度水準を設定する。但し、振動数 0.2Hz かつ最大速度 450mm/s の条件は変形過大となるので、振動数 0.39Hz で代替する。ここでダンパー速度（以下 v_d ）とはダンパー内部の作動油流速に直接かわるピストンの有効速度を意味する。実験条件を表 4 中○印で示す。なお、また、以下では、 V_r を下回る速度領域を C1 領域、上回る速度領域を C2 領域と呼ぶ。

加振波形概念図を図 3 に示す。所定振幅の正弦波 5 サイクルの前後 1 サイクルにテーパーを掛けたものである。実験結果を整理する際には原則として 3 サイクル目を対象とする。

- 2) 部分バイパス実験：試験体には要素ダンパー毎に両油室のストロークエンド付近を連結する実験用バイパス配管が設けられている。今般実験における最大変位±184mm が生じて同配管の流路は確保される。同配管を順次開閉することで各要素ダンパーの有効／無効を切り替えデータを取得する。実験ケース分類を表 5 に示す。要素ダンパー番号は本体固定側を 1、ロッド側を 3 とする（図 1 参照）。実験ケース T は上述の減衰性能確認実験で実施するものである。

たとえば、実験ケース 1 による特性 Z_1 は、要素ダンパー 1 が有効な時の特性 z_1 と要素ダンパー 2,3 がバイパスされた時の特性 z_{B2}, z_{B3} 、および要素ダンパー部以外の摩擦等を表す残差項 z_e の和として、

$$Z_1 = z_1 + z_{B2} + z_{B3} + z_e$$

と表現でき、他の実験ケース $T, 2, 3, 0$ もこれに倣って表現し整理すると、式(1)を導くことができる⁹⁾。Z は実験による評価値であり、C1 領域においては C1、C2 領域については発生減衰力 F を用いる。

$$\left. \begin{aligned} Z_T &= Z_{sum} \\ Z_{sum} &= Z_1 + Z_2 + Z_3 - 2Z_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

振動数とダンパー速度の組合せを表 4 中◆印で示す。振動数水準は、製品出荷試験の条件として設定されうる範囲を考慮して、減衰性能確認実験で用いた水準のうち 2 水準を採った。加振波形は減衰性能確認実験と同様である。

本実験により第一式が適切な精度で成立すれば、今後の出荷試験を第二式のみで実施できるというロジックである。

写真 1 試験体取付状況

図 2 主要計測点模式図（図中記号は表 3 参照）

表 3 主要計測点一覧

記号	計測内容	設置位置
D	ダンパー全体変形	ダンパー全長間
P	各油室圧力	各油室のストロークエンド近傍
T	表面温度	各油室位置に相当する鋼材部表面
DM	加振台変位フィードバック	実験施設内蔵

表 4 減衰性能確認実験および部分バイパス実験 実験条件一覧

ダンパー速度 目標値(mm/s)	加振振動数(Hz)		
	0.2	1.0	1.6
16	○, ◆	○, ◆	○
150	○, ◆	○, ◆	○
450	(0.39Hz) ○, ◆	○, ◆	○

○：減衰性能確認実験、◆部分バイパス実験

図 3 加振波形概念図（正弦波）

表 5 部分バイパス実験ケース分類

実験ケース	要素ダンパー3	要素ダンパー2	要素ダンパー1
T	有効（配管閉）	有効（配管閉）	有効（配管閉）
1	無効（〃開）	無効（〃開）	有効（〃閉）
2	無効（〃開）	有効（〃閉）	無効（〃開）
3	有効（〃閉）	無効（〃開）	無効（〃開）
0	無効（〃開）	無効（〃開）	無効（〃開）

図 4 仮想建物モデルの刺激関数および固有振動数

3) ランダム波加振実験：建物の地震応答波形を模擬する実験用入力波形を、仮想の40階建超高層建物モデルの地震応答解析によって作成した。同仮想モデルはダンパー試験体に生じるストローク変位および速度の双方が適度に大きくなることを考慮して諸元を設定したものであり、建物としての成立性を十分に検討したものではない。1～5次の刺激関数と固有振動数を図4に示す。上部構造は弾性せん断モデルとし、等価減衰定数の平均値が5%程度となるような層間ダンパーを配置した。高減衰オイルダンパーは5階床ー地上間にシアリンク型の取付部材を介して設置した。地震動入力位置は1階床位置とし、告示適合波八戸位相（極稀に発生するレベル）および同神戸位相（極稀に発生するレベルの振幅を1.2倍したもの）の2波を用いた。前者による5階床位置相対変位をKH波、後者をKK1.2波と呼び、加振台変位信号として用いる。両波形を図5に示す。前者は比較的大きな荷重振幅が長く繰り返されるケース、後者は最大荷重に近い荷重が単発的に与えられるケースとして位置づけた。

4) 多数回繰り返し実験：1)で述べた減衰性能確認実験の1ケースである振動数0.39Hz、最大速度450mm/sの加振（1回目と称す）を実施したのち、振動数0.39Hz、最大速度380mm/sの加振を繰り返す（2回目、3回目...と称す）。加振波形は図3に示したものとする。加振間には油温の上昇が筐体（鋼材）表面まで伝達される時間として、15～30分のインターバルを設ける。後続の加振で製品の限界温度として設定されている80℃を超えると予測された場合には実験を終了する。

4. 実験結果

4.1 減衰性能確認実験

実験結果として得られた減衰性能曲線を図6に示す。結果の整理に当たっては、全体変形からダンパー剛性 K による変形分を差引き、さらに微分してダンパー速度 v_d の時刻歴を求めた上で、C1領域については、減衰力 F の正負最大値近傍（原則として0.8倍以上）のデータを用いて線形近似によりC1を $F-v_d$ 関係の勾配として求めた。図6上には F の最大値（正負問わず）に対応する点としてプロットした。C2領域については、正負それぞれについて F の最大値と同発生時刻の v_d の関係を求めた。0.2Hz、0.39Hzの実験ケースについては5Hzの、1.0Hz、1.6Hzについては10Hzのローパスフィルターを施した。

製品製造上の標準値および許容範囲（±10%）を図中に実線および破線で示す。振動数水準によらず、いずれの実験結果も精度よく標準値近傍の値を示す。破線丸中に示したメーカー保有試験機による、より小振幅（ v_d 目標値8mm/s）の実験結果も概ね同様であった。

4.2 部分バイパス実験

実験結果を表6に示す。C1領域の実験については4.1と同様にC1を求めた。C2領域については、実験条件の v_d 目標値近傍で実験ケース $T_{1,2,3,0}$ に共通な速度を定め、正（引）側、負（押）側それぞれについて対応する F を取得した。実験データにはサイクルごとに若干のばらつきがあることを考慮して、2～4サイクル目の増速時および減速時の計6データを取得した上で平均を採った。実験ケース1,2,3,0の結果から式(1)第二式により Z_{sum} を求めた。

部分バイパス実験を製品出荷試験に用いることを想定した場合、ダンパーの製造工程を総合的に考慮すると式(1)の誤差を±3%以内とすることが望まれる。表中の Z_{sum}/Z_T を誤差に読み替えると最大は1.7%であり、同試験ロジックの成立性を示す結果といえる。

図5 ランダム波加振実験入力変位波形

図6 減衰性能確認実験結果

表6 部分バイパス実験結果

実験条件		正/負	Z_{sum}	Z_T	$\frac{Z_{sum}}{Z_T}$	評価値 Z
加振振動数(Hz)	v_d 目標値(mm/s)					
0.2	16	—	214.3	218.1	0.983	C1(kN・s/mm) F (kN)
	150	正	5180	5135	1.009	
0.39	450	負	-5192	-5165	1.005	
		正	6187	6244	0.991	
1.0	16	負	-6099	-6157	0.991	C1 F
		正	212.3	211.4	1.004	
	150	正	5106	5076	1.006	
		負	-5083	-5020	1.013	
	450	正	5969	5960	1.002	
		負	-5934	-5873	1.010

図7 ランダム波加振実験減衰力時刻歴

図8 ランダム波加振実験ダンパー速度ー減衰力関係

また、低速度水準における実験ケース 0 により把握できるダンパー全体の摩擦力は 10kN 程度であった。これは、中小地震時において高減衰オイルダンパーに期待される減衰力に比べごく小さい。

4.3 ランダム波加振実験

図 7 に、実験結果として得られた減衰力時刻歴波形を示す。前述した両波形の位置づけが概ね実現されている。

図 8 に両実験のダンパー速度－減衰力関係を減衰特性図上に示す。ダンパー速度は加振台変位記録を用いて求めたので、剛性寄与分として取付治具等実験施設の変形も考慮した。取付治具等の剛性値は今般の一連の実験に伴う測定に基づき 1,400kN/mm を用いた。いずれの実験においても時々刻々のダンパー速度－減衰力関係は試験体ダンパーの減衰性能設計標準値に近似した軌跡を描く。

図 9 に両実験の加振台変位－減衰力関係を、ばね－ダッシュポットを単純に直列させた Maxwell モデルによる解析結果と重ね書きして示す。Maxwell モデルには表 7 の諸元を用いた。実験結果と解析結果は良好に一致し、高減衰オイルダンパーの特性は単純な Maxwell モデルで表現できることがわかる。

4.4 多数回繰り返し実験

図 10 に温度計測点 6 点の最高値及び平均値の時間変化を示す。5 回目終了後に計測温度最高値は限界温度に近接した 73.8℃に至った。表 8 には各加振における吸収エネルギーを示す。比較のためランダム波加振実験における吸収エネルギーも併せて示す。

図 10 中の計算値は、各加振における吸収エネルギーを要素ダンパー近傍（図 1 中網カケで示した、筐体、シリンダ、ロッド、要素ダンパー隔壁等の鋼材全部および要素ダンパー油部）の熱容量 1390kJ/℃で除して累加したものである。4.5 回目の計測温度最高値と計算値はほぼ一致しており、限界温度に達するかどうかの判定は上記のような簡単な仮定により可能と考えられる。また、加振条件が同一である 2 回目から 5 回目までの吸収エネルギーはほぼ同一であり、図示しないが、その間の減衰力－ダンパー変位関係もほぼ全に一致することから、この程度の繰り返し条件においては、高減衰オイルダンパーの力学特性に変化は見られないと言える。

図 10 中には、比較のため 2000kN オイルダンパー 3 基の熱容量に基づく計算値を一点鎖線で示した。2000kN×3 基では限界温度 80℃に未達なのは 2 回目までであり、高減衰オイルダンパーの温度上昇に対する余裕度は相対的に大きい。これは、筐体の強度設計において鋼材体積を相対的に増大させたことが有利に働いたものである。

5. まとめ

高減衰オイルダンパーの実大性能実験結果は以下のようにまとめられる。

- ・正弦波加振による減衰性能確認実験において、所定の減衰性能が精度よく確認された。また、建物の地震応答波形を模擬したランダム波に対しても、所定の速度－減衰力関係が時々刻々発揮されることが確認された。
- ・多数回繰り返し実験では、限界温度の設定値を超えない温度領域において力学特性に変化が見られないことを確認した。また、限界温度への到達判定は油室近傍の熱容量を用いた検討で可能であることを示し、既往製品に比して余裕度が大きいことも明らかにした。
- ・部分バイパス実験によるダンパー全体特性評価結果は、ダンパー

図 9 ランダム波加振実験加振台変位－減衰力関係

表 7 Maxwell モデル諸元

項目	単位	数値	備考
一次減衰係数 C1	kN・s/mm	203	標準値×0.90
二次減衰係数 C2	kN・s/mm	2.66	標準値×0.95
リリーフ荷重 Fr	kN	4752	標準値×0.99
ダンパー剛性 K	kN/mm	900	標準値×1.00
取付治具等剛性 K'	kN/mm	1400	測定値

図 10 多数回繰り返し実験温度上昇計測値および計算値

表 8 加振毎の吸収エネルギー

加振	吸収エネルギー(kJ)	加振	吸収エネルギー(kJ)
1 回目	15945	5 回目	12764
2 回目	12854	－以下参考－	
3 回目	12853	KH 波	5371
4 回目	12824	KK1.2 波	4583

全体を対象とした実験結果と良好に一致した。今後、この手法を用いた製品出荷試験が可能である。

本技術は高層建物の耐震性向上および地震応答性状の改善に大いに貢献するものであり、今後の適用・展開を期待するものである。

参考文献

1) 日本免震構造協会運営委員会：特別寄稿 2014 年度免震制振建物データ集 積結果, MENSIN, No.89, pp.20～25, 2015.8
2) 田村, 金子, 北村, 斉藤：2011 年東北地方太平洋沖地震における東京の高層住宅での揺れと室内被害および対応行動に関するアンケート調査, 日本建築学会技術報告集 第 18 巻 39 号, pp.453～458, 2012.6
3) 山本, 嶺脇, 二木, 鴨下：高容量オイルダンパーの開発（その 1）全体概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, pp.727～728, 2014.9
4) Caltrans Seismic Response Modification Device (SRMD) Test Facility, <https://structures.ucsd.edu/node/62>, (2016-3-22 参照)
5) 中原, 露木, 山本ほか：高容量オイルダンパーの開発（その 3）出荷試験方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B2, pp.731～732, 2014.9

[2015 年 12 月 1 日原稿受理 2016 年 3 月 14 日採用決定]