

トリリニア型オイルダンパの開発

石原 幸子 ・ 中原 学

1 はじめに

地震による被害から人と建物を守るため、建築物はただ損傷・倒壊しないだけでなく、安心・安全な居住空間の確保や居住者の恐怖心を和らげることが非常に重要である。

地震に対する建築物の構造は、「耐震」、「制振」、「免震」に分けることができる。「耐震」とは、建築物自体の粘りや強さで地震に耐える構造である。「制振」とは、建築物の任意の階に制振装置（ダンパ等）を設置し、層間変位（各階のずれ）を抑え、建築物の変形を低減させる構造である。両者は建築物に伝わった地震力をいかに抑えることができるかが重要となる。

これに対して「免震」とは、地盤と建築物を絶縁させ、地盤から建築物に伝わる揺れを低減させる構造である。そのため、免震建築物は居住空間や居住者の安全性を高めることができる。

2 日本の地震と建築基準の歴史と免震の普及

日本は多くの巨大地震を経験し、そのたびに建築基準を改正している（表1）。1948年に発生した福井地震を教訓に、1950年に初めて建築基準法が制定された。1964年の新潟地震では液状化が問題となり、1968年の十勝沖地震ではコンクリートのせん断破壊が起きた。この2つの地震を教訓に、1971年に建築基準法が改正された。1981年には震度7でも倒壊・損傷しない新耐震基準が導入された。現在の耐震基準もこのときの改正を基にしており、これ以降に建てられた建物を新耐震基準と呼ぶ。1995年に発生した兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）では、旧基準の建物に被害が集中し、新基準の建物は被害を免れたと言われている。また、当時2棟あった免震建築物が無傷であったことから免震建物が注目されるようになった。

2003年に発生した十勝沖地震では、震央から約

250km離れた苫小牧で石油タンクの火災被害が発生した。この頃から長周期地震動という言葉が一般社会に広がり、免震・制振構造の採用が広がった。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）により、長周期地震動への対策が強化されるようになった。今後起こりえる南海トラフ沿い巨大地震や内陸直下型地震等の大振幅地震動への対応が急務となっている中、免震用オイルダンパの需要も増え、要求性能も変化している。

表1 日本の地震と建築基準法の変遷

1923	関東大震災 M7.9
1924	市街地建築物法改正 世界で初めての耐震基準の制定
1948	福井地震 M7.1 壁の少ない建物に被害が集中
1950	建築基準法制定（旧耐震） 必要な壁量を追加
1964	新潟地震 M7.5 地盤の液状化
1968	十勝沖地震 M7.9 鉄筋コンクリート短柱化とせん断破壊
1971	建築基準法改正 柱の補強規定の追加 コンピュータ解析による知見の反映
1978	宮城県沖地震 M7.4
1981	建築基準法改正 新耐震設計法の導入
1995	兵庫県南部地震 M7.3 旧基準の建物に被害が集中 免震・制振構造が注目される
2000	建築基準法改正 免震・制振構造の普及
2003	十勝沖地震 M8.0 震源から200km以上離れた苫小牧で石油タンク火災被害
2011	東北地方太平洋沖地震 M9.0
2016	熊本地震 M6.5（前震）M7.3（本震）

3 開発の背景

本報で紹介するトリリニア型オイルダンパは免震用オイルダンパであり、株式会社熊谷組様と共同開発した速度依存型減衰係数可変オイルダンパである。通常の免震用オイルダンパは速度によって減衰係数の切り替わらないリニア特性か、切り替わりが1回のバイリニア特性のみであった。バイリニア特性は1次減衰係数と2次減衰係数で構成されており、1次減衰係数領域では傾きを大きくして、低速で高減衰力を発生させることができる。2次減衰係数領域では、傾きを小さくして、オイルダンパの破損を防いでいる。

それに対し、本品は1次減衰係数を低速域と中速域に分け、減衰係数の切替わりが2回のトリリニア特性になるようにした。今後想定される巨大地震に向けて、低速域では免震効果をより発揮できるように傾きを現行品よりも小さくし、中速域では建築物が擁壁に衝突することを回避できるように傾きが急激に大きくなる。

カヤバシステムマシナリー(株) (以下KSM) は、建設会社と共同で様々なオイルダンパを開発してきた。変位によって減衰係数を切り替えるオイルダンパとして、大成建設株式会社様との共同開発であるパッシブ変位切換型オイルダンパ (KYB技報第52号で紹介)、清水建設株式会社様との共同開発品である可変減衰型オイルダンパ (KYB技報第55号で紹介) がある。変位依存型と速度依存型は建物構造設計者の判断によるものであり、どちらが良いと言えるものではない。

本開発品である速度依存型は、標準の免震ダンパ (BDS : Building Damper hi-Speed type) のバルブの構成部品を1つ追加するだけで実現可能であったため、製作が容易で短期間での評価を行うことができた。

4 開発ダンパの構造と作動原理

図1にトリリニア型オイルダンパの構造を示す。免震用オイルダンパはインナーチューブ、アウターチューブ、ピストンロッド、ピストン、減衰バルブ、作動油から構成される。

ピストンロッドとピストンは連結されており、インナーチューブ内部の黄色部 (A室・B室) に作動油が密閉されている。ピストンとボトム側のシリンダには減衰バルブ (調圧弁・リリーフバルブ) が組み込まれており、速度に応じて減衰力が発生する。オイルダンパの構造はKSM標準品であるBDS型オ

イルダンパと同様である。

オイルダンパは両端に取り付けられる物体の相対変位に応じて伸縮する。ダンパが伸びてピストンが動くときA室の圧力が上昇し、伸び側の減衰バルブ (調圧弁・リリーフバルブ) が開き、作動油がB室に流出する。この時の、減衰バルブを作動油が通過する際の油圧抵抗により発生したA室とB室の圧力差によりピストン速度に応じた減衰力として作用する。また、A室はB室よりピストンロッド分の作動油が少ないため、チェックバルブが開くことによりタンク室からB室へ作動油が補充される。

ダンパが縮む時、チェックバルブが閉じ、B室の圧力が上昇する。そして縮み側の減衰バルブ (調圧弁・リリーフバルブ) が開き、作動油がA室へ流出する。伸びる時同様、減衰バルブを作動油が通過する際の油圧抵抗により発生したA室とB室の圧力差によりピストン速度に応じた減衰力として作用する。また、ピストンロッド体積分の余剰作動油はボトム側のシリンダに組み込まれている。減衰バルブ (調圧弁・リリーフバルブ) が開くことでタンク室へ流出する。

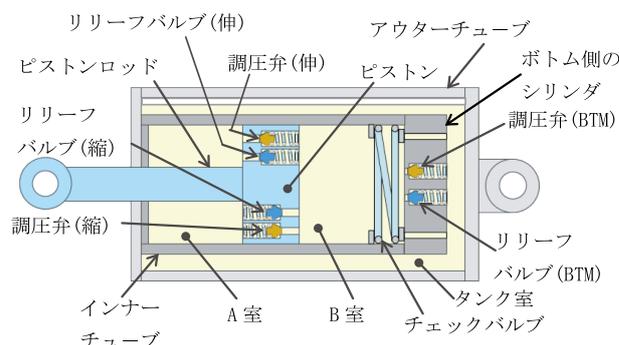


図1 免震用オイルダンパ概略図

5 減衰性能の確認試験

5.1 設計仕様

本オイルダンパの設計仕様を表2、減衰力特性を図2に示す。標準品であるBDS120-B-1 (最大力1000kN) は速度32cm/sで減衰係数を切り替える。それに対し、本開発品は、速度60cm/s以下では傾きを小さくし、速度60cm/sを超えて中速域に切り替わると、減衰係数が大きくなる。100cm/sを超えると、オイルダンパの破損を防ぐために傾きを極小にし、力の増大を抑える。また、本特性値は、要求性能に応じて切替え速度を変更する計画である。

表2 標準品と開発品の設計仕様比較

			標準品 BDS120-B-1	開発品
低速減衰係数	$C1_1$	$\text{kN}/[\text{cm}/\text{s}]$	25.0	6.67
中速減衰係数	$C1_2$	$\text{kN}/[\text{cm}/\text{s}]^2$	—	0.11
高速減衰係数	$C2$	$\text{kN}/[\text{cm}/\text{s}]$	1.695	2.0
切替力	F_c	kN	—	400
切替速度	V_c	cm/s	—	60
リリース力	F_r	kN	800	1100
リリース速度	V_r	cm/s	32	100
最大減衰力	F_{max}	kN	1000	1200
最大速度	V_{max}	cm/s	150	150

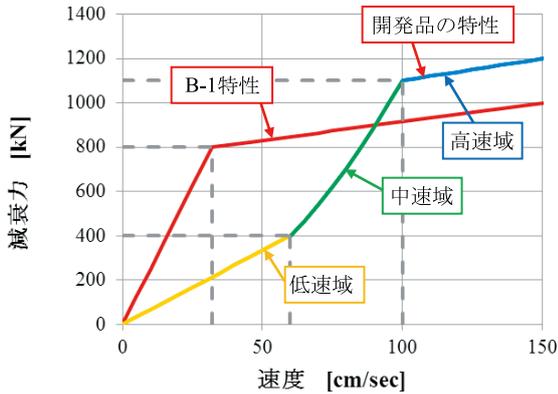


図2 減衰力特性

5.2 開発品のバルブ構成

本開発において、減衰係数が任意の速度地点で高くなるように切り替えることは技術的に難しいため、専用のバルブを開発した。調圧弁概略図を図3に示す。本バルブはKYB保有特許（特第5466539号）を利用している。

具体的な構造は、ハウジング内部に規制部材を追加し、調圧弁が規定のストローク量に達すると、規制部材とぶつかり、調圧弁の移動量を規制できることである。特許内容については、特許紹介を参照いただきたい。

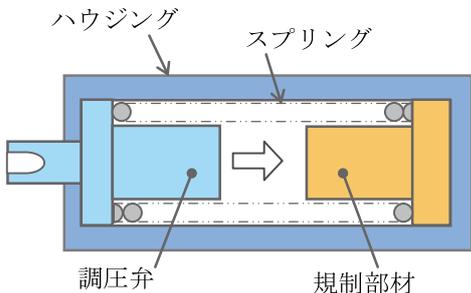


図3 調圧弁の概略図

5.3 試験概要

5.3.1 試験内容

本試験では、下記項目について確認を行った。

①減衰力確認試験

正弦波加振により、計画通りの減衰力-変位履歴図が得られるかを確認する。

(正弦波加振の説明は次頁図6に記載)

②切り替り位置確認試験

切り替り速度とその前後での変化を確認する。

③周波数依存性確認試験

同速度の実験を複数の周波数で行い、依存性の有無を確認する。

5.3.2 試験体

試験体はKSM保有の評価用ダンパを使用し、減衰バルブのみ製作して組み込む。ダンパ外観を図4に示す。

型式：BDS120

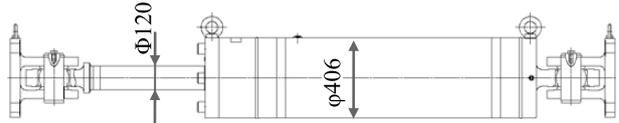


図4 試験体概略図

5.3.3 加振条件

加振条件を表3～表5に示し、計画特性プロットを図5に示す。また、本試験は図6に示すように正弦波加振とし、オイルダンパ取付長近傍を加振開始位置（中立位置）とする。各速度での減衰力を測定し、その値を評価する。なお、減衰力の計算値は式(1)～(3)より算出した値を用い、測定した力値との比較を行う。

$$F=C1_1 \cdot V \quad (V < V_c) \quad (1)$$

$$F=C1_2 \cdot V^2 \quad (V_c \leq V < V_r) \quad (2)$$

$$F=F_r+C2 \cdot (V-V_r) \quad (V \geq V_r) \quad (3)$$

ここで、

$C1_1$ ：低速時減衰係数 [$\text{kN}/[\text{cm}/\text{s}]$]

$C1_2$ ：中速時減衰係数 [$\text{kN}/[\text{cm}/\text{s}]^2$]

F_r ：リリース力 [kN]

$C2$ ：高速時減衰係数 [$\text{kN}/[\text{cm}/\text{s}]$]

V ：正弦波加振時速度 [cm/s]

V_r ：リリース速度 [cm/s]

V_c ：切替速度 [cm/s]

F ：減衰力 [kN]

表3 低速域の加振条件

		加振変位 [mm]			
		速度 [cm/s]			
周波数 [Hz]	周期 [s]	20	40	55	60
0.25	4	127.3	254.6	350.1	382.0
0.5	2	63.7	127.3	175.1	191.0
0.75	1.33	42.4	84.9	116.7	127.3
1.0	1	×	63.7	87.5	95.5

表4 中速域の加振条件

周波数 [Hz]	周期 [s]	加振変位 [mm]				
		速度 [cm/s]				
		65	80	90	95	100
0.25	4	413.8	×	×	×	×
0.5	2	206.9	254.6	286.5	302.4	318.3
0.75	1.33	137.9	169.8	191.0	201.6	212.2
1.0	1	103.5	127.3	143.2	151.2	159.2

表5 高速域の加振条件

周波数 [Hz]	周期 [s]	加振変位 [mm]			
		速度 [cm/s]			
		105	120	140	150
0.25	4	×	×	×	×
0.5	2	334.2	382.0	445.6	477.5
0.75	1.33	222.8	254.6	297.1	318.3
1.0	1	167.1	191.0	222.8	238.7

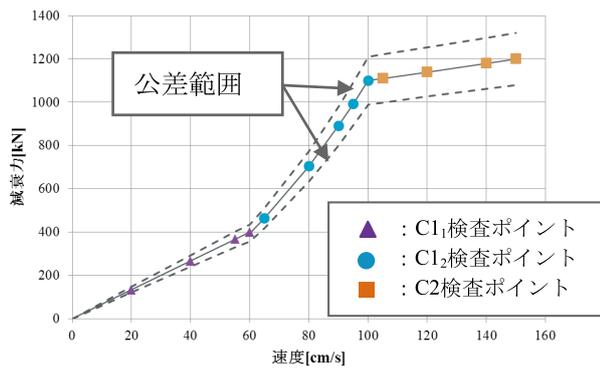


図5 加振条件 計画特性プロット

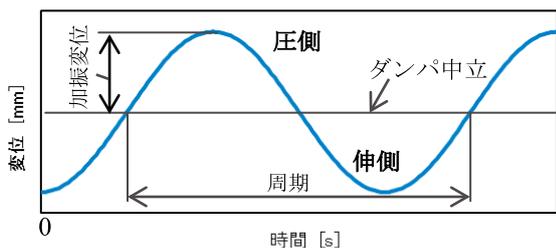


図6 正弦波波形の説明

5.3.4 試験結果

周波数0.5Hzで加振した時の減衰力-変位履歴図を図7～図9に示す。建築の場合、変位履歴図でダンパ特性を評価する。また、計画特性との比較をするため、速度と最大減衰力の関係をプロットしたグラフを図10、図11に示す。

①減衰力確認試験

低速域である20cm/s, 40cm/s時では、低めにふれているが、その他の領域については、特性公差

中央近傍に入っていることを確認した。

②切り替わり位置確認試験の結果

低速から中速への切り替え速度である60cm/sと、中速から高速への切り替え速度（リリース速度）である100cm/sとその前後（±5cm/s）の検査ポイントにおいて、計画特性と一致した減衰力が発生しており、計画通りに特性が切り替わっていることを確認した。

③周波数依存性確認試験の結果

低速と高速域での周波数依存性はほぼ見られなかった。中速域では周波数の影響が多少見られるものの、実運用時には免震建物の固有振動数が0.16から0.3Hz(周期3～6秒)であるため、実建物への影響は少ないと考える。

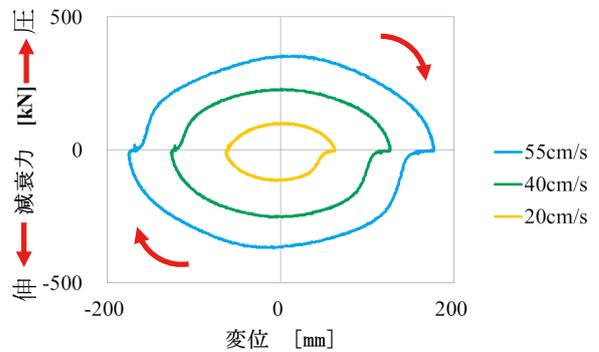


図7 低速域の減衰力-変位履歴曲線 (0.5Hz)

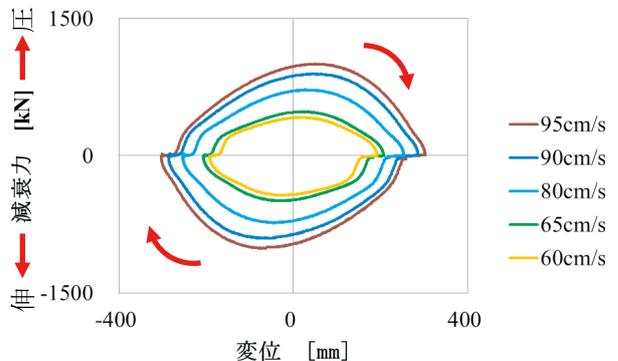


図8 中速域の減衰力-変位履歴曲線 (0.5Hz)

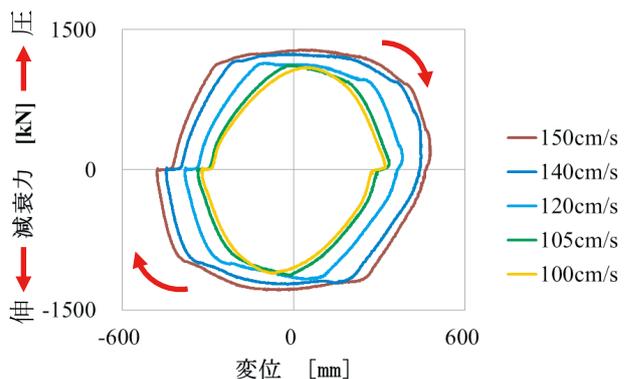


図9 高速域の減衰力-変位履歴曲線 (0.5Hz)

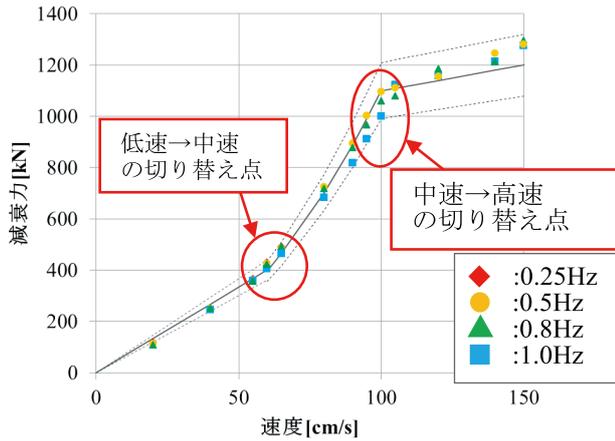


図10 伸び側の加振結果

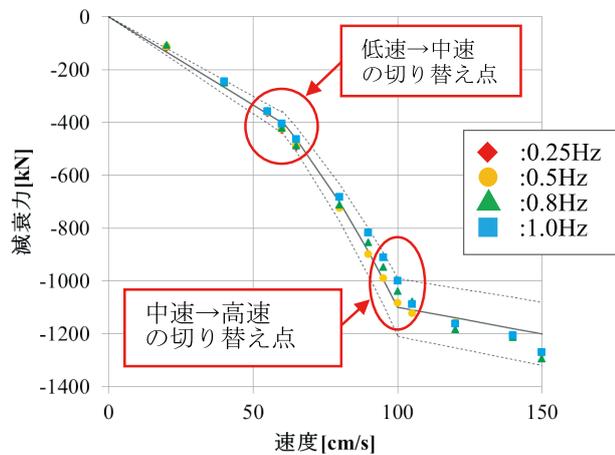


図11 縮み側の加振結果

6 まとめ

トリリニア型オイルダンパの原理試作品を製作し、減衰特性を確認し、実現可能であることを確認した。本年度は製品化に向けて、量産型のオイルダンパの設計・試験を行い免震用部材としての大臣認定を申請し、来年度に認定取得予定である。本オイルダンパは、新築の免震建築物の大振幅地震動のみならず、既存の免震建築物の免震性能の向上にも寄与できることが期待される。

本製品の開発にあたって協力いただいた株式会社熊谷組のご担当の皆様、社内各部門、関連協力業者の皆様に、深く感謝申し上げます。

著者



石原 幸子

2015年入社。カヤバシステムマシナリー(株)三重工場技術部。KYB事業開発推進部よりKSMへ転籍。オイルダンパ開発業務に従事。



中原 学

1991年入社。カヤバシステムマシナリー(株)三重工場技術部専任部長。KYB岐阜南油機技術部設計室よりKSMへ転籍。オイルダンパ開発業務に従事。