

可変減衰型オイルダンパ

榊原 健人

1 はじめに

地震による被害から人々の命と財産を守るため、建物に対して様々な地震対策がとられている。そのうちの一つである「免震構造」に用いられるオイルダンパについて、KYB技報52号で都市型狭小土地向け免震ダンパ（減衰力切替機構外付）、KYB技報54号でロック機構付き免震用オイルダンパシステム（電気制御を用いた風揺れ低減システム）を紹介してきたが、本報では減衰力可変機構を内部に組み込んだオイルダンパを紹介する。

2 長周期地震動などの巨大地震に対する課題

近い将来の発生が危惧される南海トラフや相模トラフの巨大地震では、ゆっくりとした揺れを長時間にわたり繰り返す長周期地震動に見舞われる可能性が高いと考えられている。こうした長周期地震動に対してゆっくりと揺れる免震建物は、これまでの設計で想定した揺れを大きく上回る揺れになる可能性がある。例えば、長周期地震動に対する検討が行われていない初期の免震建物では、免震層（免震装置の入る地面と建物の間）の許容変形範囲が小さいため、建物が擁壁（免震層の壁）に衝突する可能性も指摘されている。また、新築の免震建物でもアイソレータ（積層ゴム、滑り支承など）の限界変形を超えるような大きな揺れが生じることも想定される。

こうした背景のもと、免震層の変形量を小さくする試みが行われている。免震層の変形抑制には、アイソレータと併設するダンパの減衰力を大きくすることが効果的である。しかし、想定される最大の地震をもとにダンパの減衰力を設定すると、免震層全体が固くなる。そのため、発生頻度が比較的高い中小地震では、地震による変形量ももともと小さいため、変形を抑えすぎてしまい、地震の揺れを建物に伝えないという本来の性能（加速度低減効果）を損なう恐れがある（図1）。

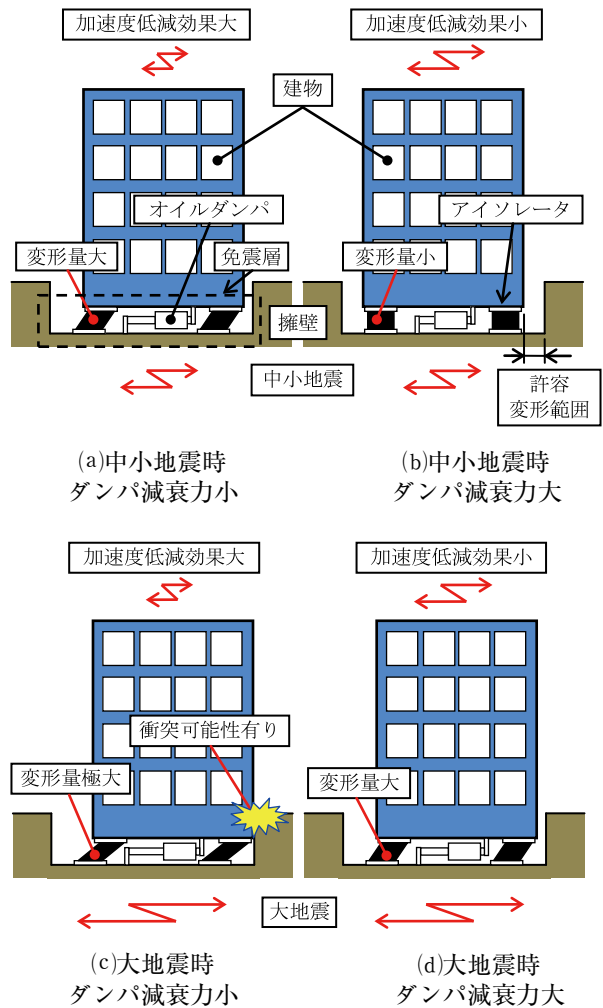


図1 ダンパ減衰力による免震建物への影響

3 開発背景

本報で紹介する可変減衰型オイルダンパは清水建設(株)様と共同開発した製品である。前述した通り、巨大地震を想定してダンパの減衰力を設定してしまうと、発生頻度の高い中小地震において、アイソレータによる加速度低減効果を阻害してしまう。

この一見矛盾する課題は、巨大地震と中小地震に対して、それぞれに適した減衰性能に切り替えるこ

とができれば、居住性の向上と大地震時の過大変形防止を実現して解決できる。そのためには地震の大きさを検知する必要があるが、センサや電磁弁などを用いた電気制御による切替方式では、停電時に性能が発揮できないといった問題も残る。

そのため、地震の大きさを免震層の変形量（オイルダンパの変形量）により検知し、電気を使わず機械的に地震の大きさに応じた減衰性能に切り替わる「変位による減衰性能切替型の免震装置」が考案されている。その多くは設定変位を超えると大地震用の特性に変化し、一旦特性が切り替わると大きなダンパ減衰力を保持する構造としている。このため免震層の変形抑制効果が大きく発揮される。しかしながらその特徴ゆえに、地震終了後に人的作業により装置の特性を中小地震用の特性に戻すことになる。

一方、本報で紹介する可変減衰型オイルダンパはダンパ変形量に応じて機械的に減衰性能を切り替えることが可能な構造としており、ダンパ変形が小さい中央付近では中小地震用の特性である低い減衰力、設定変位を超えた場合は大地震用の特性である高い減衰力へ随時切替わる特性を有する。そのため、ダンパの減衰力と変位量をグラフとして表すと標準的オイルダンパが図2の楕円形状となるが、可変減衰型オイルダンパは図3のように中央部が凹んだH型形状となる。これにより大地震時の変形抑制効果が若干低くなるが、常に性能が切り替わることから地震後に手動操作を行う必要がない。

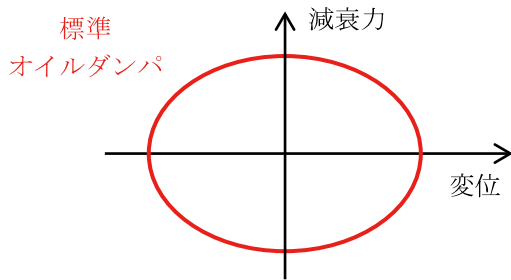


図2 標準オイルダンパ 履歴曲線形状

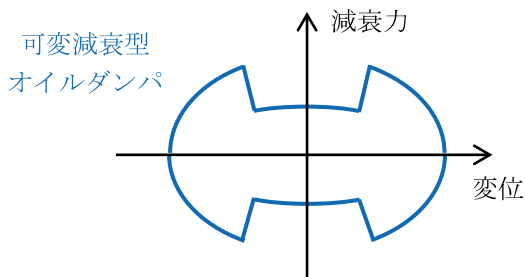


図3 可変減衰型オイルダンパ 履歴曲線形状

4 開発ダンパの構造と作動原理

図4に可変減衰型オイルダンパの構造を示す。可変減衰型オイルダンパの主要構成部品は、シリンダチューブ、インナーチューブ、ピストンロッド、ピストン、作動油などからなる。また、シリンダ内部には速度に応じた減衰力を発揮するための調圧弁、リリース弁及びチェック弁を設けており、カヤバシステムマシナリーの標準的な免震用オイルダンパBDS (Building Damper hi-Speed type) と同様の構成となっている。標準オイルダンパ (BDS) に関する詳細は、KYB技報26号にて紹介している。

可変減衰型オイルダンパは、減衰性能を変形量に応じて切り替えるための機構として、切替ロッドが加わった構造となっている。切替ロッドには、中央部の一定区間に軸方向へ伸びる溝を設けている。さらに、切替ロッドはピストンを貫通して設置され、ピストンと溝により構成される流路をそれぞれの位置関係により開閉することで減衰性能を切り替えることができ、減衰性能の切り替わるポイントを切替変位と呼称する。

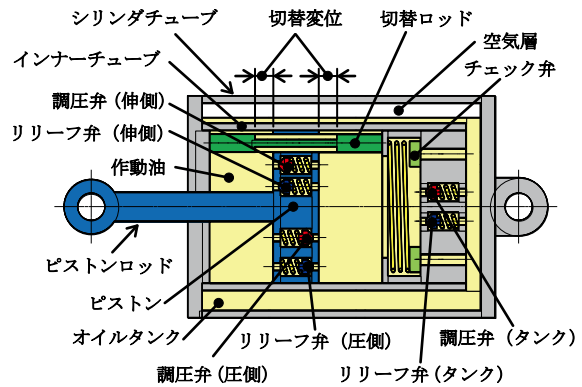


図4 可変減衰型オイルダンパ構造

また、減衰性能を可変とする機構（切替ロッド）は全てオイルダンパ内部にて完結しているため、標準オイルダンパ (BDS) と同形状、同寸法となっている（写真1）。



写真1 試験体外観

図5に可変減衰型オイルダンパの計画特性を示す。ダンパ変形量の小さな範囲での低い減衰性能を低減衰、ダンパ変形量が大きい範囲での高い減衰性能を高減衰と呼称する。低減衰時の1次減衰領域では伸側と圧側にて減衰性能が異なる。これは、可変減衰型オイルダンパが片側のみにピストンロッドが伸びた構造であり、圧側と伸側にて受圧面積が違うのに対し、切替ロッドの溝面積を圧側も伸側も一定としているためである。

減衰性能は高減衰、低減衰ともにバイリニア型とし、一定の速度で減衰性能が切り替わる特性とする。一定速度までは、低速時から高い減衰力を発揮できる特性（1次減衰領域）とし、一定速度を越えると最大速度まで過度な減衰力が出ないように、減衰力を保持する特性（2次減衰領域）に切り替わる。この特性は標準オイルダンパ(BDS)にも用いられている。

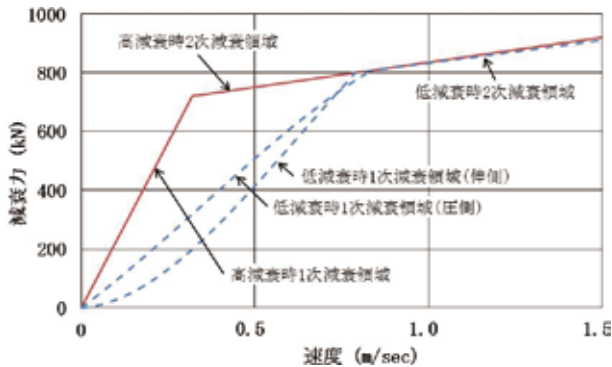


図5 計画特性

可変減衰型オイルダンパの作動原理について、以下に説明する。

(1)作動原理（伸方向、低減衰）

伸方向、低減衰での作動原理を図6に示す。可変減衰型オイルダンパは両端に取付けられる物体相互の振動に応じて伸縮する。ピストンロッドが伸びると連結されたピストンが動き、A室の圧力が上昇し、作動油は調圧弁（伸側）、リリーフ弁（伸側）及び切替ロッドの溝を通りB室に流出する。この時の油圧抵抗がピストン速度に応じた減衰力として作用する。調圧弁（伸側）、リリーフ弁（伸側）よりも切替ロッドの溝を優先して作動油が流れることにより、調圧弁（伸側）、リリーフ弁（伸側）に流れる油の量が少なくなり、調圧弁（伸側）、リリーフ弁（伸側）のみを作動油が流れる時に比べ、速度に応じた減衰力は低くなる（低減衰）。1次減衰領域は調圧弁で減衰力を制御し、2次減衰領域はリリーフ弁で減衰力を制御する。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、チェック弁よりオイルタンクからB室へ作動油を供給し、次の圧縮行程に

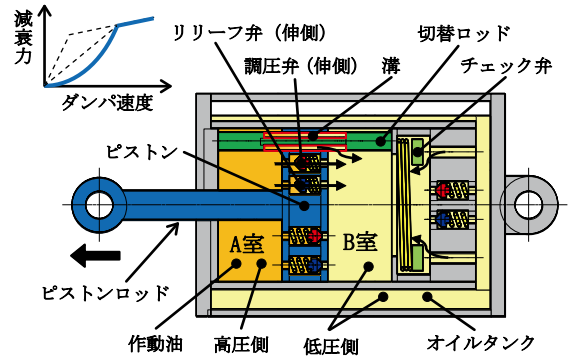


図6 作動原理（伸方向、低減衰）

備える。

(2)作動原理（伸方向、高減衰）

伸方向、高減衰での作動原理を図7に示す。ピストンロッドが更に伸び、ダンパ変形量が切替変位を超えると、ピストンが切替ロッドに設けられた溝を超え、作動油が切替ロッド部を流れなくなり調圧弁（伸側）、リリーフ弁（伸側）のみを流れるようになる。そのため、作動油は調圧弁（伸側）、リリーフ弁（伸側）を通りB室に流出し、調圧弁（伸側）、リリーフ弁（伸側）に応じた油圧抵抗がピストン速度に応じた減衰力として作用する（高減衰）。

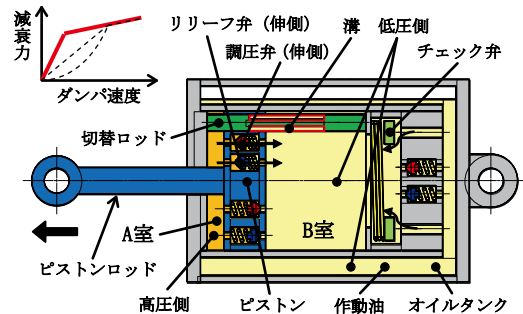


図7 作動原理（伸方向、高減衰）

(3)作動原理（縮方向、低減衰）

縮方向、低減衰での作動原理を図8に示す。ピストンロッドが縮むとチェック弁が閉じ、B室の圧力が上昇する。そして、作動油は調圧弁（圧側）、リリーフ弁（圧側）及び切替ロッドの溝を通りA室へ流出する。伸作動と同様に、1次減衰領域は調圧弁で減衰力を制御し、2次減衰領域はリリーフ弁で減衰力を制御する。この時の油圧抵抗がピストン速度に応じた減衰力として作用する。調圧弁（圧側）、リリーフ弁（圧側）よりも切替ロッドの溝を優先して作動油が流れることにより、調圧弁（圧側）、リリーフ弁（圧側）に流れる油の量が少なくなることから、調圧弁（圧側）、リリーフ弁（圧側）のみを作動油が流れる時に比べ、速度に応じた減衰力は低くなる（低減衰）。また、ピストンロッド分の作動油は調

圧弁（タンク）、リリース弁（タンク）を通りオイルタンクへ流出するが、こちらも切替ロッドの溝を優先して作動油が流れるため、速度に応じた減衰力は低くなる。

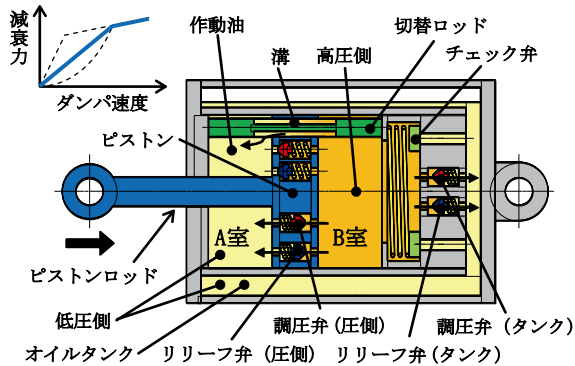


図8 作動原理（縮方向，低減衰）

(4)作動原理（縮方向，高減衰）

縮方向，高減衰での作動原理を図9に示す。ピストンロッドが更に縮み、ダンパ変形量が切替変位を超えると、ピストンが切替ロッドに設けられた溝を超え、作動油が切替ロッド部を流れなくなり調圧弁（圧側）、リリース弁（圧側）のみを流れるようになる。そのため、作動油は調圧弁（圧側）、リリース弁（圧側）を通りA室に流出し、調圧弁（圧側）、リリース弁（圧側）に応じた油圧抵抗がピストン速度に応じた減衰力として作用する（高減衰）。また、ピストンロッド分の作動油は調圧弁（タンク）、リリース弁（タンク）を通りオイルタンクへ流出する。この時の油圧抵抗がピストン速度に応じた減衰力として作用する。

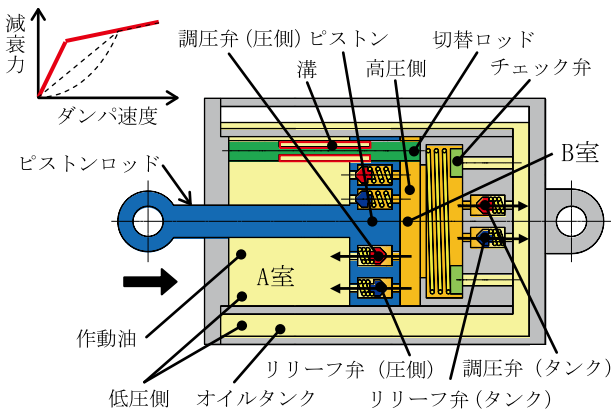


図9 作動原理（縮方向，高減衰）

れでの性能を確認するため、加振開始位置を変化させて正弦波による加振実験を行った。低減衰計測時は取付長，高減衰計測時は切替変位を超えるまで縮めた状態を加振中心とした。

図10に低減衰での結果，図11に高減衰での結果を示す。それぞれ5種類の加振速度での実験結果を重ねたグラフであり，変位が大きくなるほど速度も大きくなるため，減衰力が高くなっていく。また，低減衰では外側の2条件，高減衰では5条件全てが2次減衰領域での実験結果であり，リリース弁の効果により，減衰力が一定の値から上がりにくくなり，四角形に近い形状になっていることが分かる。

高減衰及び低減衰において，各速度時の最大減衰力をまとめたグラフを図12に示す。計画特性との比

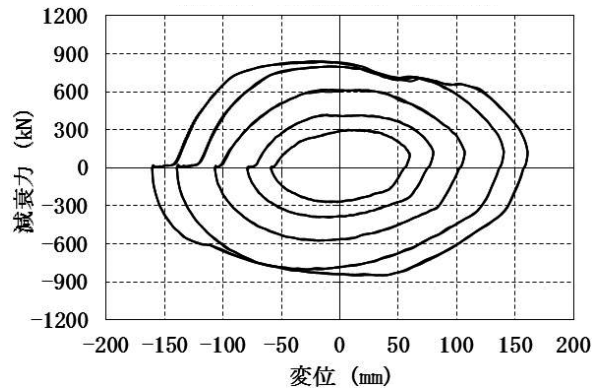


図10 減衰力-変位履歴曲線（低減衰）

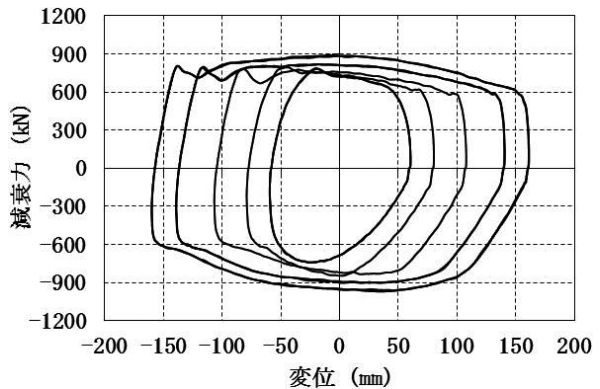


図11 減衰力-変位履歴曲線（高減衰）

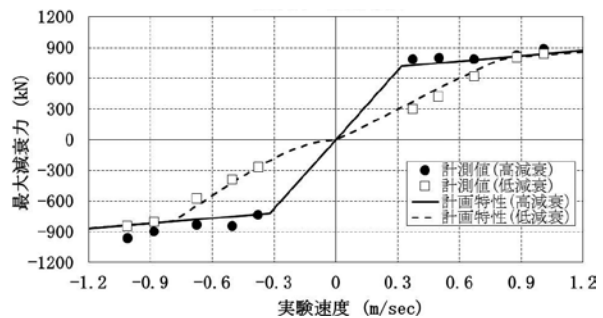


図12 最大減衰力-速度特性

5 可変減衰性能の確認

可変減衰型オイルダンパの性能に関して，計画特性の再現性を確認した。低減衰及び高減衰のそれぞれ

較のため、図5の計画特性を実線及び破線にて表す。高減衰、低減衰ともに計画特性通りの性能であることが確認できる。

切替性能の確認として、切替変位を超える加振振幅での正弦波及びランダム波での実験を行った。図13に大振幅加振でのグラフを示す。このとき、可変減衰型オイルダンパの切替変位は±200mmとしており、どの速度条件においても変位200mmを境に減衰性能が切り替わっていることが確認できる。

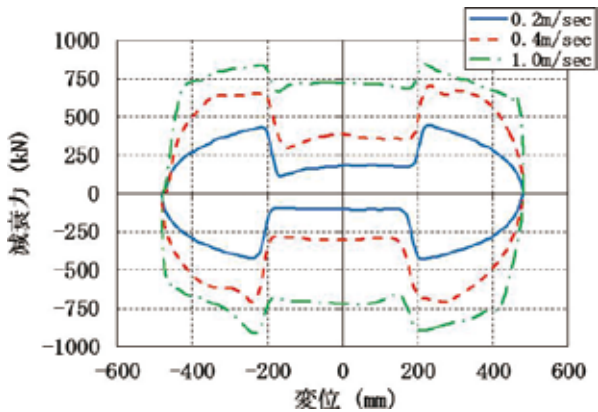


図13 減衰力-変位履歴曲線（大振幅加振）

また、ランダム波を入力とした加振実験により、計測結果と解析結果の比較を行った。図14に計測結果と解析結果を重ねた履歴曲線を示す。計測結果と解析結果の履歴曲線を比較すると、繰り返し切替変位±200mmにて減衰性能が切り替わっていることが確認できる。また、解析結果と比較して、計測結果に

おいても減衰性能が切り替わる際に時間的遅れがほとんどないことが確認できた。そのため、免震建物の耐震性能を検証する地震応答解析においても、切替にかかる時間を考慮する必要はないと考えられる。

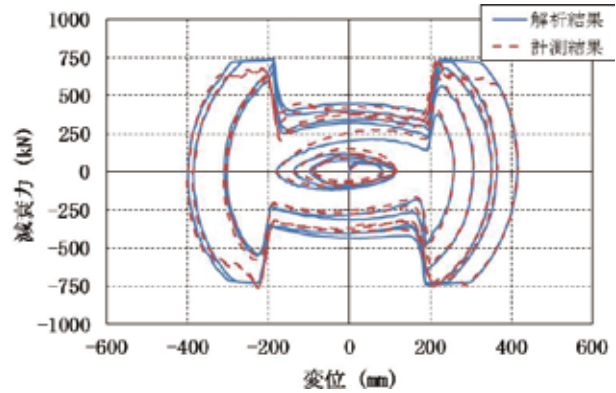


図14 減衰力-変位履歴曲線（ランダム波）

6 おわりに

可変減衰型オイルダンパは、2017年4月に免震用部材として大臣認定（認定番号MVBR-0576）を取得した。今後、免震建物の中小地震時における居住性の向上、及び大地震時における免震建物の擁壁への衝突防止に役立つことが期待される。

最後に、本製品の開発にあたってご協力いただいた清水建設(株)のご担当の皆様、社内各部門、関連協力業者の皆様には、深く感謝申し上げます。

著者



榎原 健人

2011年入社。カヤバシステムマシナリー(株)三重工場技術部。オイルダンパ開発業務に従事。