

内部調圧機構を有する粘性ダンパーの 性能検証実験

姫野岳彦¹・濱田由記¹・吉田雅彦²・比志島康久³

¹川口金属工業株式会社 技術本部開発部 (〒307-0017 茨城県結城市若宮8-43)

E-mail: himeno@kawakinkk.co.jp, hamada@kawakinkk.co.jp

²川口金属工業株式会社 技術本部技術二部 (〒530-0012 大阪府大阪市北区芝田2-6-23)

E-mail: m-yoshida@kawakinkk.co.jp

³川口金属工業株式会社 技術本部 (〒332-8502 埼玉県川口市宮町18-19)

E-mail: hishijima@kawakinkk.co.jp

既設橋梁の耐震補強のために、制震デバイスとしてシリンダー系ダンパー装置が採用される事例が増えつつある。シリンダー内に流体を封入し、その流動抵抗によって減衰力を得る機構は、すでに多岐にわたる分野で一般化された技術であるが、それを土木構造物に用いる場合には、常に外気と接し、真夏の直射日光や冬場の積雪など過酷な温度環境下に曝されるため、特に長期間に渡る性能の安定性が強く求められることになる。そこで、筆者らは、これらの事象を考慮した新しい粘性ダンパーの開発を行った。この装置の特徴は高速な振動に追従可能なダンパー構造に、アキュムレータによる内部調圧機構を設けた点にある。本文は性能検証実験結果を中心に、ダンパー装置の特性評価法等の概論についてまとめたものである。

Key Words : Viscous Damper, Accumulator, Structural Control, Seismic Retrofit

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、橋梁の耐震補強の必要性が広く認知され、すでに約10年が経過しているが、実際には、日本全国に存在する道路橋の多岐にわたる橋梁条件等により、その補強工法には制約が生じることが多く、未だ十分な対応が図れているとは言い難い状況にある。それらの多くは、架設当時の設計思想の違いなどから下部構造や支承部の耐力が不足しているものの、橋脚が河川内に位置しており、容易に巻立て工法を用いることができない場合や、桁下空間が著しく狭く、支承取替え工法が困難であるなど難しい問題を抱えている。

このような橋梁に対する新しい耐震補強工法の選択肢として、地震時の振動エネルギーを吸収、散逸させて、橋脚の補強量を低減あるいは省略させることが可能なダンパー装置¹⁾の需要が高まりをみせている。

このダンパー技術に関しては、減衰性能を付加したゴム材料や鋼材の変形を利用するもの、すべりによる摩擦減衰効果を期待するものなど、すでに数多くの装置が提案されているが、その中のひとつに流体の流動抵抗を利

用したシリンダー系のダンパーがある。この技術の利用分野は非常に幅広く、様々な機械装置や自動車、軍事物資などをはじめとして、建築構造物のブレースや基礎免震などにも採用され、すでに多くの知見や検証事例などが見受けられる。

本文では、このシリンダー系のダンパー装置のうち、内部に粘度の高い流体を封入させた粘性ダンパーを対象として、まず、本装置の概要および基本性能の検証データ等をまとめ、次に、土木構造物への適用を考えた場合に、その性能の安定性を図るために必要となる内部調圧機構(アキュムレータ)の効果などについて、実験結果を中心に考察を行うものである。

2. 粘性ダンパー (KVD) の概要

粘性ダンパーはシリンダー内部に充填させた粘性体をオリフィス機構内で流動させ、減衰力を得る装置である。以下に、その基本構成と基礎的な性能検証データについて概説する。

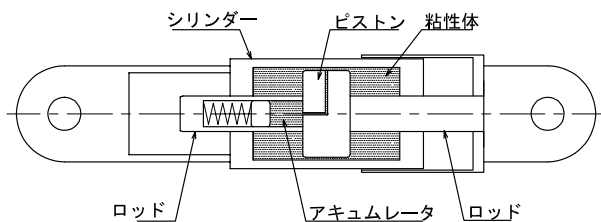


図-1 粘性ダンパー (KVD) の構造図



写真-1 粘性ダンパー性能検証実験の載荷状況

(1) 基本構成と特徴

図-1に筆者らが開発した粘性ダンパー（以下、KVDと表記）の構造図を示す。

基本構成は一般的な粘性ダンパーと同様であり、左右2つの部屋（チェンバー）に充填された粘性体がピストンの運動によって、シリンダー内径とピストン外径部との間にわずかに設けた隙間（オリフィス）を通過することで、圧力差が生まれ、それを受ける受圧面積との積により減衰力が発揮される構造となっている。なお、このKVDには、内部調圧機構としてアキュムレータを内蔵しているが、その詳細については、別途、後述する。

一般にダンパー部材の減衰力 F は、速度条件 V に比例する関係式(1)により表現されることが多く、これはそのまま動的解析における粘性減衰項に反映される。

$$F = CV \quad (1)$$

ここで、 F ：減衰力（ダンパーの抵抗力）、 C ：粘性係数、 V ：ピストンの運動速度である。

一方、実際のダンパー装置の減衰力-速度関係は、単純な線形モデルではなく、内部に封入する材料の特性により微妙に変化することになり、例えば粘度の低いオイル（機械油）を用いた場合には、その減衰力特性は、

$$F = CV^2 \quad (2)$$

と表現されることが知られている²⁾。（ただし、一般的なオイルダンパーの場合には、特殊な調圧バルブを併用することで、線形特性（式(1)）を発揮させる構造としていることが多い。）

これに対して、オイルではなく、粘度を高めた材料を封入すると、その減衰力は、

$$F = CV^\alpha \quad (3)$$

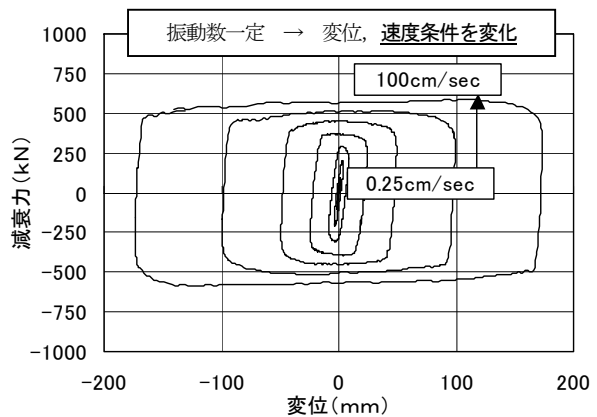


図-2 減衰力-変位関係 (KVD500kN) / 振動数一定

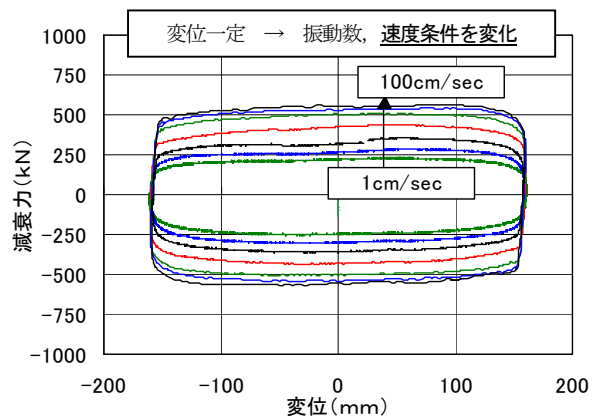


図-3 減衰力-変位関係 (KVD500kN) / 変位一定

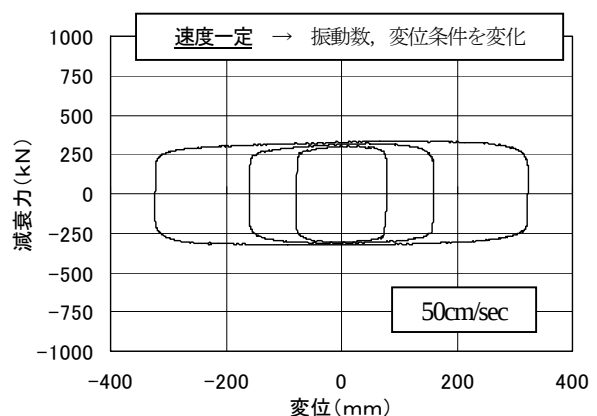


図-4 減衰力-変位関係 (KVD300kN) / 最大速度一定

と表現され、指数 α は材料の粘度により決まる定数で、現在、実用化されているものでは、0.1～0.5程度の値を取るものが多い。

(2) 減衰性能

KVDの基礎的な性能検証データを得るため、1軸の高速載荷試験装置（写真-1）を用いて実施した実験結果のうち、数例を以下に例示する。

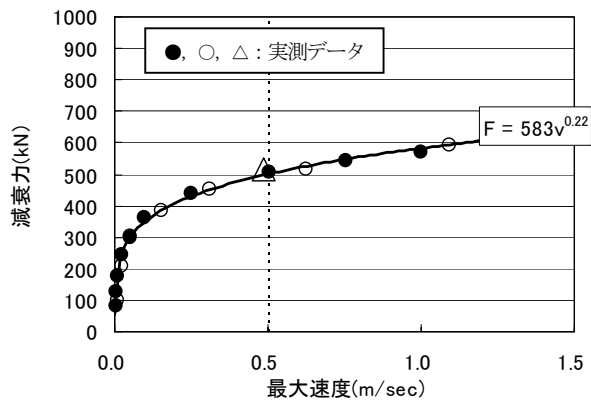


図-5 減衰力-速度関係 (KVD500kN)

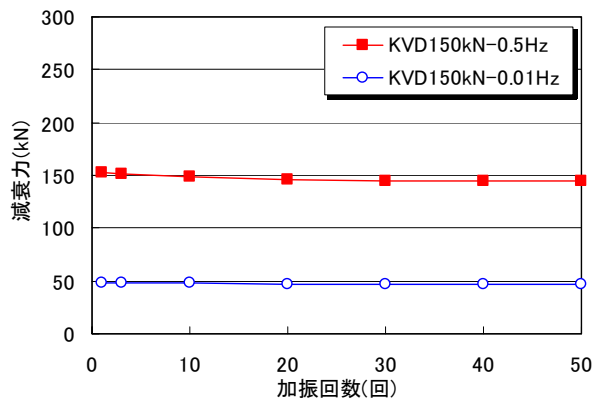


図-7 連続繰返し载荷

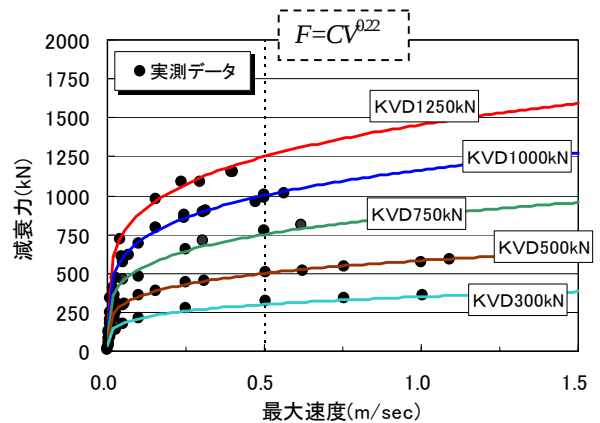


図-6 減衰力-速度関係 (KVD300～1250kN)

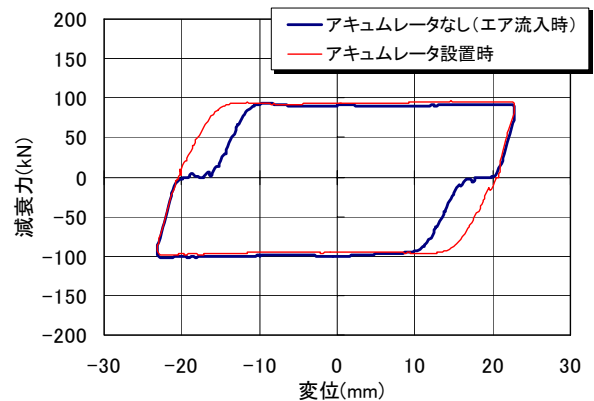


図-8 真空、エア流入による履歴波形のズレ

まず、呼称反力500kN (式(3)に示したように減衰力 F は速度 V に対して依存性を有するため、KVDでは $V=50\text{cm/sec}$ の速度で振動する際に発揮される減衰力 F を呼称反力=型式名称として定義している)における载荷実験結果を示す。図-2、図-3はともに、最大速度をパラメータとした载荷パターンを示したものであるが、それぞれ加振変位あるいは振動数を変化させている点に違いがある。

一方、図-4は最大速度を一定として、加振変位と加振振動数を変化させたパターン(供試体にはKVD300kNを使用)である。これらから、KVDは速度条件に対してのみ依存性を示し、低速から高速へと変化するに従い、減衰力が大きくなる傾向が読み取れる。このことは、橋梁用のデバイスとしては非常に重要な桁の温度伸縮等の低速移動時にはその抵抗力は小さく、大規模地震時の振動のような高速移動時には所定の大きな減衰力を発揮するといった理想的な特性を有していると言える。

ここで、この速度条件に着目して整理するために、正弦波により载荷した各履歴波形のうち、最大速度に達する変位ゼロ(y切片)時の荷重値を当該载荷条件における減衰力と定義して集計を行うと、図-5を得ることがで

きる。この図において、なめらかな曲線の依存性を表すのが式(3)における指数 α であり、本実験結果(KVD)の場合、 $\alpha=0.22$ でほぼ近似できる。

次に、粘性体は同一の材料としたまま、シリンダーおよびピストンの形状のみを数種類変更して製作した供試体に対して载荷を行った結果を図-6に示す。この図から、式(3)で表現される指数 α は、粘性体の材料特性により定まる値であり、粘性係数 C は、ダンパー本体の形状(オリフィス、受圧面積)により決まる値であることが確認できる。

また、粘性ダンパーのもう一つの特徴としては、部材が塑性変形や摩耗などの損傷を起こすことなく、効率的にエネルギー吸収(運動エネルギーを熱エネルギーに変換)する点にある。このため、鋼材の変形や摩擦を利用しているダンパー装置に比べ、その耐久性が著しく向上し、繰返し载荷に対して、高い安定性能を発揮することができる。図-7にはタイプI地震動など繰返し振動回数の多い地震波に対する安定性確認のために実施した50回の連続载荷実験の結果を示す。この図から、その安定性は非常に高く、繰返し振動中、減衰性能はほとんど変化しないことが確認できる。

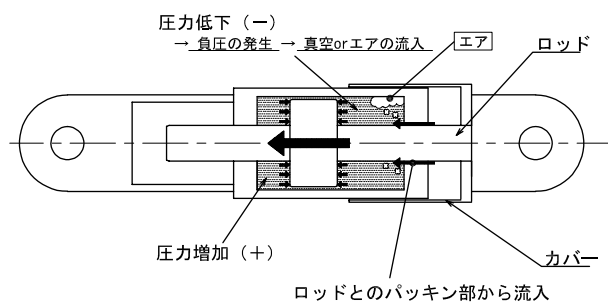


図-9 負圧によるエアの流入

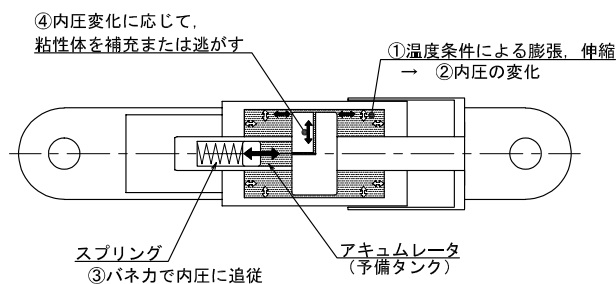


図-10 アキュムレータの作動原理

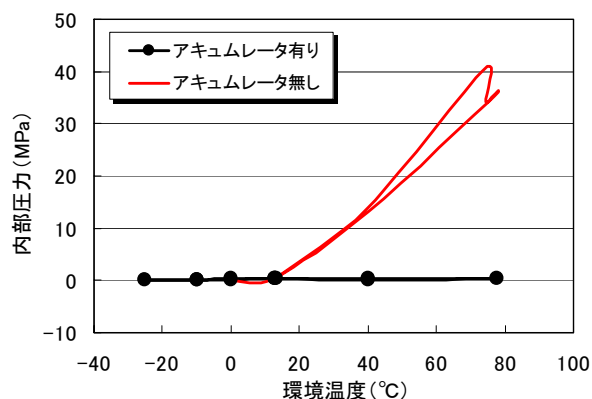


図-11 内部圧力の計測結果

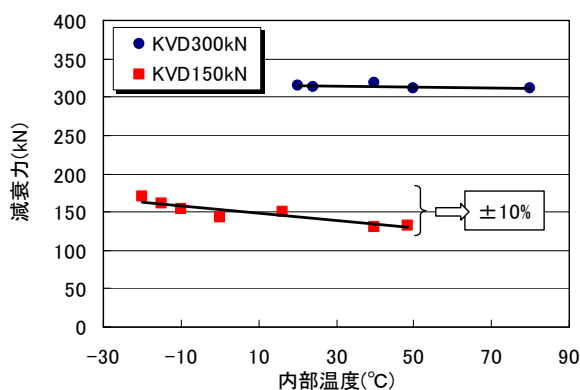


図-12 温度依存性

3. 内部調圧機構（アキュムレータ）

(1) アキュムレータの必要性

土木構造物に粘性ダンパーを用いる場合、機械装置や建築構造物に適用する場合とは違って、常に外気に曝され、橋梁の架設場所によっては、年間を通じての温度差が非常に大きな環境下に置かれることも想定される。

粘性ダンパーに対して温度条件が変化すると、それに伴い、内部の粘性体の体積に膨張あるいは収縮の変形が生じる。そのため、高温時には粘性体の膨張によってシリンダーの内圧が増加し、粘性体が外部へ流出することを防いでいるパッキンに対して、過度の負荷がかかり、その使用耐久性（耐用年数）を低下させる恐れがある。一方、逆に、低温時には粘性体の収縮によってシリンダー内の圧力が減少し、真空ができるか、あるいはパッキン部などから外部のエア（空気）を吸い込んでしまい、ピストンの移動時に粘性抵抗のない、スリップによる履歴波形のズレが発生する場合がある。（図-8）

また、温度変化が生じていない状態であっても、図-9に示したように、ピストンの動きに伴い、負圧が発生することで、シリンダー内に外部からエアが流入する恐れも懸念される。

このような現象に対して、外部からのエアの流入を防ぎ、内部の圧力性状を一定に保って、常に理想的な平衡

状態を実現させるために用いられる機構がアキュムレータである。これは、オイルダンパー等では、ごく一般的に用いられているものであるが、粘性ダンパーの場合、その材料の粘度が高いことからアキュムレータの予備タンクとシリンダー本体内との粘性体の受け渡しがスムーズにはいかず、技術的な課題が存在している。そこで、ここでは、このアキュムレータ構造を粘度の高い流体に対しても感度良く有効に作動するように改良を加え、その性能検証のために実施した実験結果等について考察を行う。

(2) 作動概要

アキュムレータの作動原理を図-10に示す。

ダンパー装置全体のコンパクト化のため、ロッド内に予備タンクを設け、シリンダー内の圧力に変化が生じて、上昇に転じた場合には、ピストン部分のバルブを通して、アキュムレータ内へ粘性体が逃げ込み、シリンダー内の圧力の平衡が保たれるように機能する。一方、粘性体の収縮や負圧の影響によりエアの流入の恐れがある場合には、アキュムレータ内に設置した調圧スプリングの効果により予備タンクからシリンダー内に粘性体が補充され、このときも内圧の平衡が保たれるように調整可能な構造となっている。

(3) 性能検証実験

今回開発した粘性ダンパー用のアキュムレータ構造の動作確認と減衰性能の検証のために実施した計測結果等を以下に示す。

図-11はダンパーの環境温度とシリンダー内の内部圧力との関係を計測したデータであるが、アキュムレータを設置することで、内部圧力を温度条件によらず一定に保つことが可能となっていることが分かる。また、先に示した図-8からもエアの流入による履歴波形のズレは解消できていることが確認できる。なお、本図では矩形履歴のうち1次剛性の傾きが他のデータに比べて低い値を示しているが、これはこのときの载荷に用いた実験装置および計測治具等の変位量などが含まれてしまっているためである。ダンパー本来の特性としては、図-2～図-4に示したように、高い1次剛性の値を示す。

また、広範囲な温度条件に対して、実際の減衰性能を計測した結果(図-12)では、その依存性は非常に小さく、大きくても±10%程度の範囲に収まっている。

これらのことから、アキュムレータを設置することで、懸念されていた問題点をクリアし、過酷な温度条件下でも、常に安定した性能を維持可能であることが確認できた。

4. 粘性ダンパーの特性評価

先に示したように式(3)で表現される粘性ダンパーには種々の性能を有するものが実用化されている。それらの最も大きな違いは粘性体の粘度の違いに集約される。本項では、この粘度の選定がダンパー性能に与える影響について簡単に考察する。

まず、粘性体の粘度が低い場合の特徴について考えると、1)速度依存性が強くなる、2)ダンパーの製作工数が減少する(コストが抑えられる)、3)アキュムレータを設置することで広範囲にわたる性能安定性が実現できる、などがあげられる。

これらを個々に見ていくと、1)の速度依存性が強くなるという点は、式(3)における指数 α が大きくなり、次第に「1」に近づく状態を示している(図-13参照)。このため、動的解析による耐震設計の際には、この特性を考慮したモデル化を行うことが望ましいと考えられる。

次に、2)の製作工数の点については、ダンパーを製作する際にはシリンダー内部に粘性体を充填することになるが、粘度が高い材料の場合、その充填作業に多くの時間を要する(容易には充填できない)ことになり、また、あわせて充填時に混入してしまうエアの除去作業も困難となるので、多大な設備と労力を要してしまうことにな

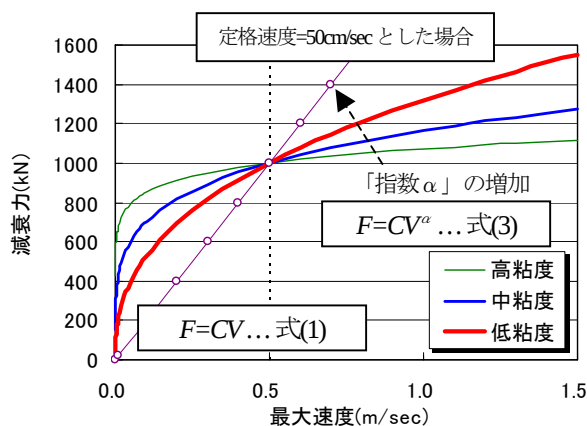


図-13 減衰力-速度関係 (粘度の影響)

る。このことはダンパーの性能上には直接的な影響は与えないが、建設コストの縮減が求められる中、デバイスの製作コストを可能な限り抑えることは重要な課題である。

3)のアキュムレータの設置については、粘度が小さいオイルなどの場合には、少しの内圧変化に対して、流体が予備タンクとシリンダー内をスムーズに移動できるが、粘度が高い材料を用いると、この感度が鈍くなるため、バルブ構造の詳細検討など、特殊な改良を加える必要性が生じることになる。このため、例えば速度依存性を少なくする目的で粘度が著しく高い材料を用いると、調圧機構としてのアキュムレータの設置が困難になるという相反する関係にあることに留意して、ダンパー性能の評価を総合的に検討する必要があると考えられる。

なお、これまでの実験データ等で示したように、粘性ダンパーは速度条件に対して、減衰力を発揮する装置であるため、その設計や仕様の決定に際しては、減衰力やストローク(移動量)の値だけでなく、速度条件を明確に示すことが非常に重要である。

5. おわりに

本文では、粘性ダンパーに着目して、その実験結果等をふまえながら、性能評価上の考え方について示した。ここでの知見を整理すると、以下の通りである。

- 1)粘性ダンパーの特性は、粘性体の粘度とダンパー形状を表現する2つのパラメータ(C , α)により評価することができる。
- 2)粘度の比較的高い材料を用いても、感度の良いアキュムレータ構造を開発したことで、ダンパー内部の圧力を調整し、性能の安定性を向上できることを確認した。

なお、今回はダンパー自体の性能検証結果を中心に述べたが、今後は本デバイスの合理的な適用・設計方法を把握するために、粘性ダンパーだけでなく、すでに数多くの種類が提案されているダンパー装置全般を対象として、それらを選定する際の最適化の考え方等について検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) (財) 海洋架橋・橋梁調査会：既設橋梁の耐震補強工法事例集，2005.4.
- 2) 露木保男：免制振用オイルダンパ，油空圧技術，No.Y08-09A，pp.40-47，1999.1.

(2007.06.29 受付)