

動的加力実験に基づく免震用オイルダンパーの減衰性能に関する研究

名古屋大学 工学部 環境土木・建築学科

建築学コース 飛田研究室 角空音

1. 背景と目的

大地震時の建物損傷軽減と機能維持の観点から免震建物の需要は増えており、免震用オイルダンパーは免震構造の一端を担う部材として重要になっている。本研究では、様々な動的加力実験を通して、オイルダンパーの減衰性能把握を行う。また、実験結果に基づくオイルダンパーの詳細なモデルの構築を行い、一般的なモデルとされる Maxwell モデル(図 1)との比較を行う。

2. 免震用オイルダンパーを用いた動的加力実験

2.1 対象ダンパー並びに実験の概要

名古屋大学減災館において6年間設置されていたダンパー8基を用いて実大実験を行う。全てのダンパーは Bi-Linear 型であり、図 2 に設計値を示す。実験には出荷検査に用いられている油圧サーボ式の試験機を用いた。試験機は変位制御であり、計測体制を図 3 に示す。一般的にオイルダンパーは速度・減衰力波形で評価するが、本実験では正弦波加振を用いた上に速度が生じて減衰力が発生しない区間である空走距離(図 4)で実験結果を評価することから変位・減衰力波形を用いることとする。

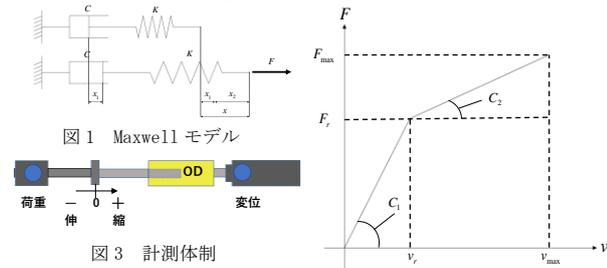


図 1 Maxwell モデル

図 3 計測体制

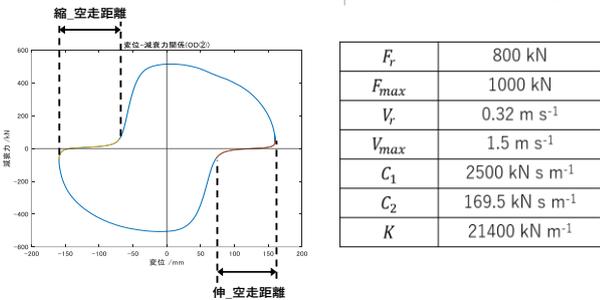


図 4 空走距離の概念図

図 2 ダンパー減衰特性

2.2 建物取り外し直後のダンパーを用いた実験

建物取り外し直後のダンパーの履歴ループと Maxwell モデルによる履歴ループを比較した(図 5)(図 6)。Maxwell モデルは空走距離に対する考慮がなされていないため、空走距離の大きいダンパーの実測波形に対する差が大きくなっていると考えられる。

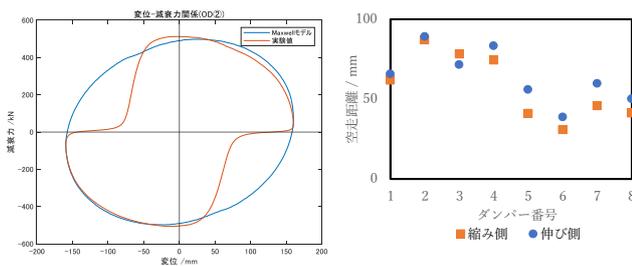


図 5 実測波形と Maxwell モデルの比較

図 6 空走距離結果

2.3 空走の特性に関する実験

2.2 より、現状用いられている Maxwell モデルは空走の発生に対して適していないと考えられるため、空走の特性を探る実験を行い、空走の発生原因を考察することで、空走の一般性を探る。

2.3.1 エア抜き加振前後に着目した実験

オイルダンパー製造メーカーでは、完成直後の免震ダンパーの中の空走が大きい個体に対しては、エア抜き加振と呼ばれる大振幅低速加振を実施し、空走を少なくする処理を実施して出荷している。本実験では、エア抜き加振前後における空走の変化を確認した。図 7, 図 8 より、エア抜き加振前後において空走距離の減少が見られた。これは、エア抜き加振を通して空気が溶け込んだインナーチューブ内の油とインナーチューブ外の油が入れ替わることで、インナーチューブ内の空気が排出されることによるものと考えられる。

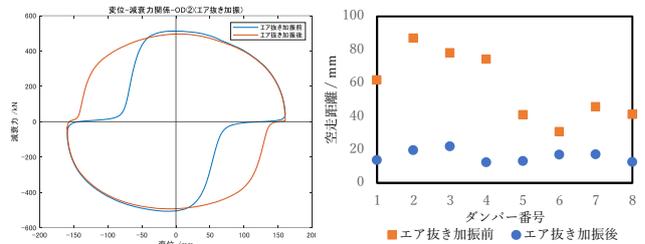


図 7 ダンパー2の履歴ループ

図 8 伸び側の空走距離比較

2.3.2 ダンパー内の圧力変化に関する実験

一般的に建物にダンパーを設置する前にダンパー上部のバルブから大気を開放することでダンパー内圧力と大気圧を等しくさせる。本実験では、ダンパー内圧力を大気圧と比べて等しい状態を標準、高い状態を正圧、低い状態を負圧とし、それぞれの状態における空走距離の違いを分析した。図 9, 図 10 より、空走距離は負圧>標準>正圧となっていることが見てとれ、これは負圧状態では油の蒸気圧とインナーチューブ内の圧力が等しくなったために油の中に溶け込んでいた空気が気泡として析出し、正圧状態では空気が油に溶け込んだことによるものと考えられる。

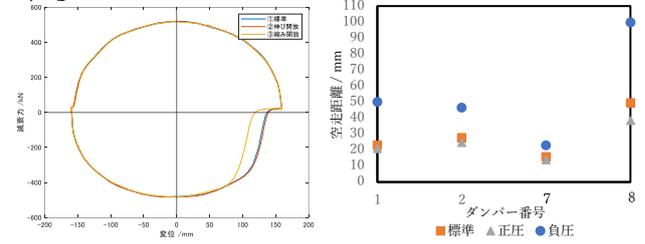


図 9 ダンパー2の履歴ループ

図 10 伸び側の空走距離比較

2.3.3 時間経過を考慮した実験

建物設置後の空走距離の変化を調べるため、時間経過と空走距離の関係を分析した。ダンパーを設置して、1日、約1週、約1カ月が経過したときの空走距離を計測した。図 11 より、時間経過と空走距離には相関は見られず、時間経過に応じた空走距離の変化はないと考えられる。

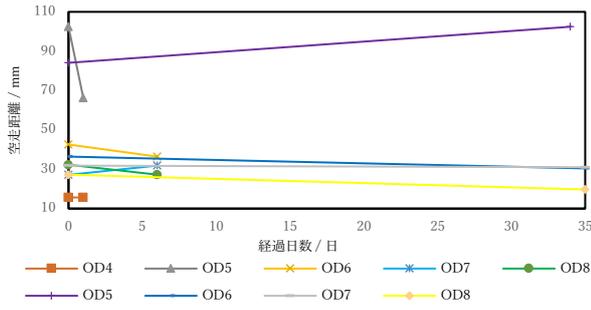


図 11 伸び側の時間経過による空走距離の変化

2.3.4 ダンパーの取り扱いによる影響を考慮した実験

輸送や設置作業時に傾いたり、微小振動を受けたりといった外的影響がダンパーに及ぶことを想定し、ダンパーを上下逆にして加力実験を行った。図 12, 図 13 より、加力後に空走距離が大幅に大きくなっていることが見てとれ、インターチューブ内に空気が入り込んだことが原因であると考える。

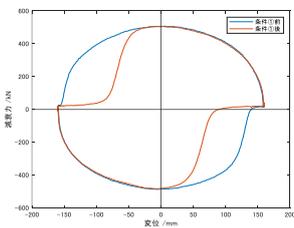


図 12 ダンパー2の履歴ループ

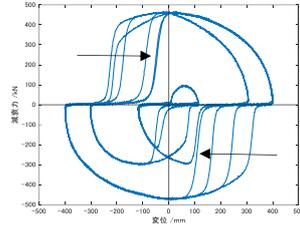


図 13 加振中の空走距離の変化

3 空走を考慮した免震用オイルダンパーのモデル構築

3.1 提案モデル概要

提案モデルは、バネ要素として空走距離を生じさせる要素(空走要素)を捉えることでMaxwellモデルにバネが直列で繋がったモデルとしてダンパーを表現する。

3.2 空走の原因の考察

空走の原因として、ダンパー内の空気、バルブの非線形性、機械的なガタが挙げられるが、実験結果より空走要素はダンパー内の空気の存在が支配的であると考えられる。ダンパー内では、図 14 に示すように①空気がかたまりとして存在②空気が細かい気泡として存在③空気が油中に溶けることで気体としての性質を失っている状態が相互に移り変わっている。空走が生じるときには①→②、②→③の変化の方が②→①、③→②の変化よりも支配的であると考えられ、②→③の変化における気泡を含んだ油の見かけの体積弾性係数は、気泡の圧縮を断熱圧縮とすると式(1)で表される。油の体積弾性係数を K_0 、気泡を含んだ油の体積弾性係数を K_a 、大気圧下での気泡の混入率を x_0 、大気圧を P_0 、内部圧力を P 、断熱指数を κ とする。

$$K_a = \frac{1 + \left(\frac{x_0}{1-x_0}\right) \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{\kappa}}}{1 + \left(\frac{x_0}{1-x_0}\right) \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \left(\frac{K_0}{\kappa \cdot P}\right)} \cdot K_0 \quad (1)$$

式(1)より、圧力が高まるにつれ、気泡は油中に溶解し、油の見かけの体積弾性係数が大きくなる一方で、油中の気泡が減り、油に溶解する気泡の量が減少することで、体積弾性係数の上昇率が小さくなるが見てとれる。

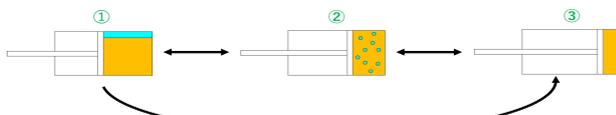


図 14 オイルダンパー内の空気の状態図

3.3 提案モデルの理論的背景

図 15 より、空気のみの場合(状態 A)では、体積弾性係数を K_A 、気体定数を R 、絶対温度を T 、受圧面積を S 、空気物質量を n とすると、式(2)、式(3)が成り立つ。

$$PV = nRT \quad (2)$$

$$K_A = (S \times x_1) \frac{(P - P_0)}{S \times (x_1 - x_2)} \quad (3)$$

空気と油の場合(状態 B)では、体積弾性係数を K_B 、ダンパー内圧力を P' 、油に溶解した空気の物質量を n' とすると、式(4)、式(5)が成り立つ。

$$P'V = (n - n')RT \quad (4)$$

$$K_B = (S \times x_1) \frac{(P' - P_0)}{S \times (x_1 - x_2)} \quad (5)$$

式(2)~式(5)より、 $K_A > K_B$ が成り立つ。また、状態 A のときの剛性を k_A 、状態 B のときの剛性を k_B とすると、体積弾性係数と剛性の関係より、 $K_A > K_B$ のとき、 $k_A > k_B$ が成り立つ。提案モデルの空走要素は状態 A を仮定しているため、 k_B を圧力上昇に応じて増加させる必要がある。

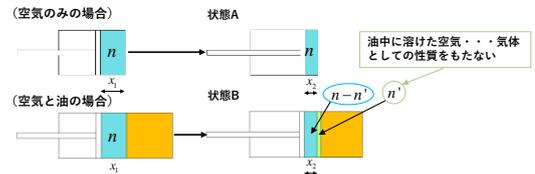


図 15 油中の空気の変化図

3.4 空走要素の提案式

図 14 の①→②では、空気が気泡ではなくかたまりとして存在するために、空気の表面積に対する油と空気の接している面積の割合が気泡のときと比べて小さいため、空気が油に溶解する速度が遅く、3.2 と同様に体積弾性係数の上昇率は小さくなると考えられる。①~③の変化に応じた空走要素の剛性の式を提案する(式(6) (式(7))。a, c を空走マジックナンバー、b, d を空走距離マジックナンバー、x をバネ全体の変位とする。

$$\text{(第二象限)} \quad k_2 = \left(\frac{1 - \exp(ax + b)}{1 + \exp(ax + b)} + 1 \right)^{-1} \quad (6)$$

$$\text{(第四象限)} \quad k_2 = \left(\frac{1 - \exp(cx - d)}{1 + \exp(cx - d)} + 1 \right)^{-1} \quad (7)$$

3.5 パラメータの同定

式(6)、式(7)のパラメータを推定するために、第二・四象限では提案モデル、第一・三象限ではMaxwellモデルを用いて、減衰力波形の同定を行った(図 16)。式(6)、式(7)の理論波形との誤差を測る実測減衰力波形は第 2.2 節の OD2 から得られた実験値とする。

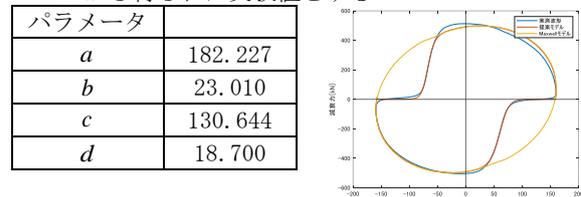


図 16 実測波形及び提案モデル及びMaxwellモデルの比較

4 結論

本研究では、様々な加力実験を通して、オイルダンパーの減衰性能を把握した。実験結果より明らかになった空走の特性から空走の発生原因になりうる加力条件を明らかにした。また、今後は空走を考慮したオイルダンパーのモデル化を行い、今後はこのモデルを用いた建物振動解析を行うことで、空走が建物に及ぼす影響の把握に取り組む。

謝辞

本論文の執筆にあたり、KYB(株)様の協力を頂きました。記して謝意を示します。