

粒状体ダンパの研究

Research on Particle Assemblage Damper

豊内 敦士
TOYOUCHI Atsushi

要 旨

ダンパは乗り物や建築物等に害を及ぼす振動を抑制する装置であり、用途により様々な種類のもが存在する。しかし、それぞれに課題があり、その代表的な例として、オイルダンパでは液漏れの発生や減衰力の温度依存性がある。粒状体ダンパはオイル等の代わりに粒状体を用いて抵抗力を発生させ振動を抑えるものであり、これらの課題に対する解決案の1つとして挙げられている。本研究では、簡素な構造でこれらの課題を解決できる可能性がある、粒状のエラストマ^{注)}を用いた二室セパレート型片出し粒状体ダンパの発生力特性および力の生成要因を明らかにするための調査、考察を行った。

本研究で用いるダンパはシリンダ内の粒子室をピストンで二室に仕切っており、このダンパの片室に粒子を充填した場合には、発生力はヒステリシスを持つ漸硬型の特性を有し、法線方向の弾性力と接線方向の摩擦力が大きく影響を及ぼすことがわかった。この時の弾性力は粒子が圧縮されることで生じる圧縮反発力が主体的であり、摩擦力はシリンダと粒子間の滑り摩擦により生じている。また、特に充填率や材質に影響するヤング率が最大発生力、ヒステリシスに与える影響が大きいことがわかった。

両室に粒子を充填した場合には、片室充填と異なる点として、摩擦力はシリンダおよびロッドと粒子との滑り摩擦により生じており、ロッドの摩擦により、発生力の波形が原点に対して非対称になっていることがわかった。

また、これらは個別要素法による発生力と粒子挙動のシミュレーションおよび実験にて検証しており、シミュレーション結果は実験結果と定性的および定量的に良く一致し、シミュレーションは実験で生じている現象を良く再現できていることを確認した。

注) エラストマは弾性を持つ高分子の総称である。

Abstract

Dampers are devices which suppress vibrations that cause harm to vehicles, buildings, and the like. There are various types of dampers, depending upon the application. However, each type of damper comes with its own problems. Typical examples of such problems are that in the case of oil dampers, liquid leakage may occur, and the damping force may be dependent on temperature. Particle dampers suppress vibrations by generating resistance force through the use of particles in place of oil or the like. These dampers can be exemplified as a possible solution to the abovementioned problems. In this study, an investigation and examination were carried out in order to clarify the generative force characteristics and force generation factors of a separated dual chamber single rod-type particle damper which employs a particulate elastomer*. This type of damper holds the possibility of solving these problems by means of a simple structure.

With regard to the damper used in this study, a particle chamber within the cylinder was divided in two by a piston. It was found that when one chamber of the damper was filled with particles, the generative force had the characteristic of being gradually hardening with hysteresis, with great influence exerted by elastic force in the normal direction and frictional force in the tangential direction. The elastic force in this case was mainly accounted for by repulsion force under compression generated by the compression of the particles, and the frictional force was generated by sliding friction between the cylinder and the particles.

Furthermore, it was found that in particular, the packing fraction and Young's modulus, which affects the material, exerted a large effect on the maximum generative force and the hysteresis.

When both chambers were filled with particles, contrary to the findings of single-chamber filling, it was found that the frictional force was generated by the sliding friction between the cylinder and rod and the particles, whereby, due to the friction of the rod, a waveform of the generative force was asymmetrical with respect to the origin.

These results were demonstrated by means of

1 緒言

粒状体ダンパはオイルダンパ等の流体の代わりに銅球やエラストマの球をダンパ内に充填したもので、ピストンによりこれらの粒子を流動させることで抵抗力を得るものである^(1,2)。既存のオイルダンパは液漏れの発生や減衰力の温度依存性等の課題があるが、粒状体ダンパはこれらの課題の解決案の1つである。粒状体ダンパでは、ダンパ摺動部より粒子径の大きい粒子を使用すれば漏れは発生せず、エラストマ球（以下、エラストマ粒子とする）を使用した場合も、耐熱性やガラス転移温度の低い耐寒性の良い材料を使用すれば、発生力の温度による変化を小さくすることができる。

本研究では、エラストマ粒子を使用し、シリンダ内をピストンで二室に仕切った二室セパレート型片出し粒状体ダンパについて、片室にのみ粒子を充填した場合と両室に粒子を充填した場合の発生力特性および力の生成要因を明らかにするための調査を行った。粒子の材質は、粒子の弾性変形を利用し、粒子の充填率を高めることで大きな発生力を得ることを狙いとし、エラストマにしている。調査としては、個別要素法を基本とした理論の構築および発生力と粒子挙動のシミュレーションを行い、実機での実験結果と比較することで、発生力特性および力の生成要因の明確化と構築した理論の妥当性の検証を行った。

なお、ダンパという言葉から、流体の圧力損失や粘性抵抗による減衰力が作用することで振動を抑制するものとイメージされるかも知れないが、本ダンパで発生する力は弾性力と粘性力を併せ持つ力である。そのため、本ダンパで生じる力は減衰力ではなく発生力と呼ぶこととする。

simulations of generative force and particle behavior using the distinct element method, as well as by experiments. The simulation results and the experimental results were in good agreement with one another both qualitatively and quantitatively, and it was confirmed that the simulations were able to reliably reproduce the phenomena which occurred in the experiments.

*“Elastomer” is a generic term for a polymer having elasticity. Rubber and the like correspond to this term.

2 片室に粒子を充填した場合の発生力特性

2.1 ダンパ構造

シミュレーションおよび実験で使用するダンパの概略構造を図1に示す。図1より、ダンパ内部はピストンによって二室に分けられており、ロッドが無い側の部屋にのみ球形の粒子が充填されている。ピストン外径部とシリンダ内径部の隙間は非常に小さく、各部屋間を粒子が移動することはない。摺動部の摩擦力は本ダンパの発生力と比較して非常に小さい値であるため、無視できるものとしている。また、以下のダンパの変位は図1のz軸方向の移動を指す。

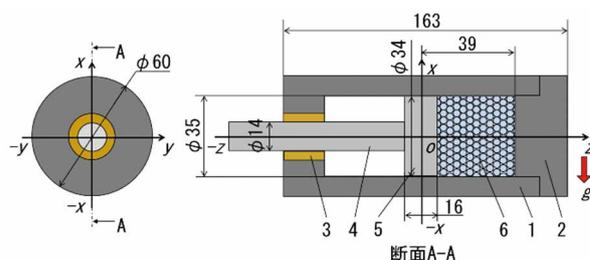


図1 ダンパ構造

1. シリンダ, 2. エンドカバー, 3. ベアリング,
4. ロッド, 5. ピストン, 6. エラストマ粒子, 単位: mm

2.2 シミュレーション・実験

2.2.1 個別要素法

シミュレーションでは、粒子の挙動や発生力の特性および構成成分を明らかにするため、個別要素法 (Distinct Element method, 以下DEM) を使用した。DEMは、粒子間の接触を考慮し、各時刻において粒子の並進と回転に対する運動方程式を逐次計算することにより、粒子の挙動を計算する手法である。

2.2.2 基礎方程式

DEMでは、個々の粒子に対して接触力を考慮し、

式(1)で表される運動方程式と式(2)で表される角運動方程式を解くことにより、粒子の速度や位置を求めることができる。

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{F}_i \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\Omega}_i}{dt} = \mathbf{T}_i \quad (2)$$

ここで、式中の*i*は粒子番号、*t*は時刻、*m_i*は粒子質量、*r_i*は粒子の位置ベクトル、*F_i*は接触力の総和ベクトル、*I_i*は慣性モーメント、*Ω_i*は粒子の角速度ベクトル、*T_i*は粒子に作用するトルクの総和である。また、*F_i*と*T_i*および*I_i*については以下の式(3)から(5)で表される。

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_{cn} + \mathbf{F}_{ct} + m_i \mathbf{g} \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_{ct} \quad (4)$$

$$I_i = \frac{8}{15} \rho \pi r^5 \quad (5)$$

式中の接触点における法線方向を添字*n*、接線方向を添字*t*で表しており、*F_{cn}*、*F_{ct}*は法線方向および接線方向の接触力となっている。また、*m_i*は粒子質量、*g*は重力加速度、*ρ*は粒子密度、*r*は粒子半径である。接触力はCundallとStrack⁽³⁾によって考案された、図2のスプリング、ダッシュポット、摩擦スライダの要素で構成されるモデルを用いており、式(6)、(7)で表される。また、図3は法線方向に加わる力と接線方向に加わる力のイメージ図である。

$$\mathbf{F}_{cn} = \left(-K_n \delta_n^{1.5} - C_n \mathbf{V}_{ij} \cdot \mathbf{n}_i \right) \mathbf{n}_i \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{ct} = -K_t \delta_t - C_t \mathbf{V}_{fij} \quad (7)$$

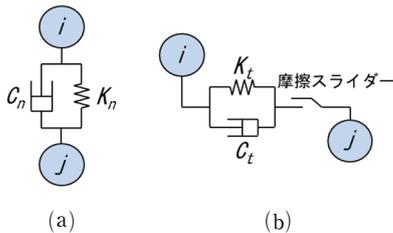


図2 接触モデル (a) 法線方向, (b) 接線方向

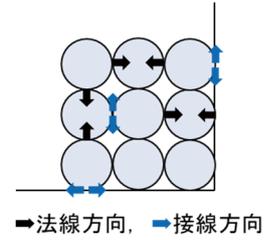


図3 法線方向の力, 接線方向の力のイメージ図

式中の*K_n*、*K_t*は法線方向および接線方向の弾性係数、*C_n*、*C_t*は法線方向および接線方向の粘性係数、*δ_n*は接触点に対する法線方向の変位量、*δ_t*は粒子*i*の粒子*j*に対する接触点における接線方向の変位ベクトル、*n_i*は接触点に対して粒子*i*から粒子*j*に向かう法線方向の単位ベクトル、*V_{ij}*は粒子*i*の粒子*j*に対する相対速度ベクトル、*v_i*、*v_j*は粒子*i*、*j*の速度ベクトル、*V_{fij}*は接触点における粒子*i*の粒子*j*に対する接線方向相対速度ベクトルである。*V_{ij}*、*V_{fij}*、*δ_t*は式(8)から(10)で表される。

$$\mathbf{V}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j \quad (8)$$

$$\mathbf{V}_{fij} = \mathbf{V}_{ij} - (\mathbf{V}_{ij} \cdot \mathbf{n}_i) \mathbf{n}_i + 2a (\boldsymbol{\omega}_i - \boldsymbol{\omega}_j) \times \mathbf{n}_i \quad (9)$$

$$\delta_t = \Delta t - \mathbf{V}_{fij} \quad (10)$$

ここで、式中の*a*は粒子半径、*ω_i*、*ω_j*は粒子*i*、*j*の角速度ベクトルである。また、法線方向の弾性係数については、Hertzの接触理論を用いた式(11)から(14)で表される。

$$K_{nij} = \frac{4}{3\pi} \left(\frac{1}{2\delta_i} \right) \sqrt{\frac{a\delta_n}{2}} \quad (11)$$

$$K_{niw} = \frac{4}{3\pi} \left(\frac{1}{\delta_i + \delta_w} \right) \sqrt{a\delta_n} \quad (12)$$

$$\delta_i = \frac{1 - v_i^2}{E_i \pi} \quad (13)$$

$$\delta_w = \frac{1 - v_w^2}{E_w \pi} \quad (14)$$

式中の添字*w*は壁面に関する量であることを表す。*K_{nij}*は粒子同士の接触時の弾性係数*K_n*、*K_{niw}*は粒子と壁面が接触する際の弾性係数*K_n*で、*E_i*、*E_w*は粒子お

よび壁面の縦弾性係数, ν_i, ν_j は粒子および壁面のポワソン比である. 接線方向の弾性係数については, 接触点でのすべりがないと仮定し, Mindlin⁽⁴⁾の理論に基づいた式(15), (16)で表される.

$$K_{ij} = \frac{2\sqrt{2a}G_i}{2-\nu_i}\delta_n^{0.5} \quad (15)$$

$$K_{iw} = \frac{8\sqrt{a}G_i}{2-\nu_j}\delta_n^{0.5} \quad (16)$$

式中の K_{ij} は粒子同士の接触時の弾性係数, K_{iw} は粒子と壁面が接触する際の弾性係数である. G_i は粒子の横弾性係数で, 式(17)で表される.

$$G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)} \quad (17)$$

また, C_n, C_t については式(18), (19)で表される.

$$C_n = \alpha\sqrt{m_i K_n}\delta_n^{0.25} \quad (18)$$

$$C_t = \alpha\sqrt{m_i K_t}\delta_{ct}^{0.25} \quad (19)$$

$$\alpha = 2.2\sqrt{\frac{\ln(e)^2}{\ln(e)^2 + \pi}} \quad (20)$$

α は粘性力の大きさを決定する無次元定数であり, 式(20)で表される. 式(20)の e は粒子の反発係数である. 摩擦力については, 接触粒子表面での接線方向相対速度ベクトルが0より大きい場合, または接線方向の接触力が摩擦力より大きい場合に接触粒子表面で滑りが発生したとみなし, 以下の式(21)から(23)で表している.

$$|V_{fij}| = 0 \text{ の場合, } F_{ct} \leq \mu_f |F_{cn}| \text{ の時,} \\ F_{ct} = F_{ct} \quad (21)$$

$$\text{また, } F_{ct} > \mu_f |F_{cn}| \text{ の時,} \\ F_{ct} = -\mu_f |F_{cn}| t_i \quad (22)$$

$$|V_{fij}| > 0 \text{ の場合,} \\ F_{ct} = -\mu_f |F_{cn}| t_i \quad (23)$$

$$t_i = \frac{V_{fij}}{|V_{fij}|} \quad (24)$$

ただし, t_i は粒子の V_{fij} 方向の単位ベクトルであり, 式(24)で表される. また, μ_f は粒子の摩擦係数である.

以上から, 解析モデルは, 法線方向は弾性力と粘性力が考慮され, 接線方向はそれに加え摩擦力が考慮されたモデルとなっている. また, 本解析での変位, 速度, 角速度の時間進行には, 2次精度のアダムス・バッシュフォース法を用いた.

2.2.3 シミュレーション・実験条件

実験装置の概略を図4, シミュレーション条件を表1, 実験条件を表2, 実験に用いた粒子を写真1に示す.

表1 シミュレーション条件

粒子材質	シリコンゴム (モメンティブ・パフォー マンス・マテリアルズ(株)製, TSE3466), ニトリルゴム (イナバゴム(株)製, NBR)
粒子径 [mm]	3, 5
充填率 [-]	0.60, 0.70
粒子数	1,339, 1,562
ストローク量 [mm]	10
加振周波数 [Hz]	1, 5
時間刻み [s]	5.0×10^{-9}
加振波形	Sin波
粒子密度 [kg/m ³]	1.10×10^3
粒子ポアソン比 ν_i	0.5
摩擦係数 μ_f (壁面-粒子)	0.5
摩擦係数 μ_f (粒子-粒子)	0.5
ヤング率 E_w [GPa] (壁面)	210
ヤング率 E_i [MPa] (粒子)	4.08 (TSE3466), 17.6 (NBR)
粘性係数 α	0.5311

表2 実験条件

粒子材質	シリコンゴム (TSE3466), ニトリルゴム (NBR)
ヤング率 E_i [MPa] (粒子)	4.08 (TSE3466), 17.6 (NBR)
粒子径 [mm]	3, 5
充填率 [-]	0.60, 0.70
ストローク量 [mm]	10
加振周波数 [Hz]	1, 5

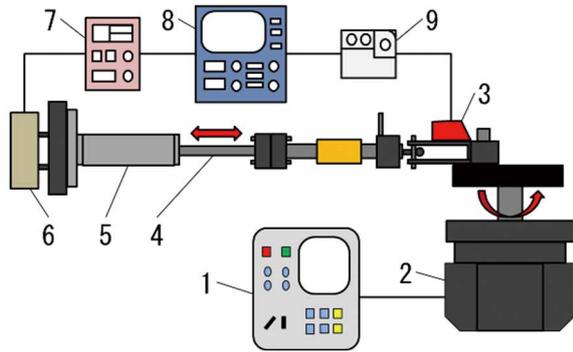


図4 実験装置

1. コントローラ, 2. モータ, 3. レーザ変位計,
4. ロッド, 5. ダンパ, 6. ロードセル,
7. 動ひずみアンプ, 8. オシロスコープ,
9. 変位計アンプユニット

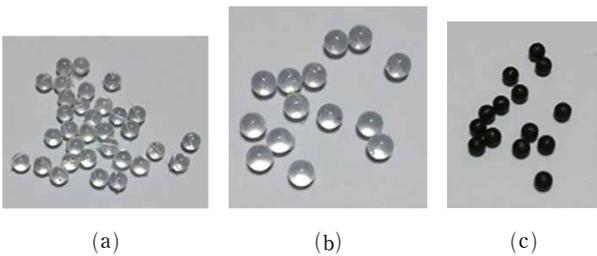


写真1 使用粒子

- (a) シリコンゴム, 粒子径 3 mm,
- (b) シリコンゴム, 粒子径 5 mm,
- (c) NBR, 粒子径 3 mm

表1の摩擦係数は、一般的なゴム-ゴムの摩擦係数の値である0.5を採用した⁽⁵⁾。表1, 2で複数パラメータが存在する条件については、赤字で示しているものを基準条件としている。また、条件中の充填率については、粒子室内に存在する粒子の割合であり、全粒子の体積を粒子室の体積で割ったものとなっている。

2.2.4 発生力の算出方法

片室充填でのシミュレーションでは、図5のように、ピストンが粒子を圧縮した時にシリンダ底面に伝わる z 軸方向の圧縮力と、粒子とシリンダ壁面との間の z 軸方向の摩擦力の合計値を発生力としている。この時、発生力の法線方向成分の力は粒子の圧縮変形により生じる粘弾性によるものであり、接線方向成分の力は粒子のせん断変形による粘弾性と、シリンダ壁面と粒子間での滑り摩擦によるものとなる。

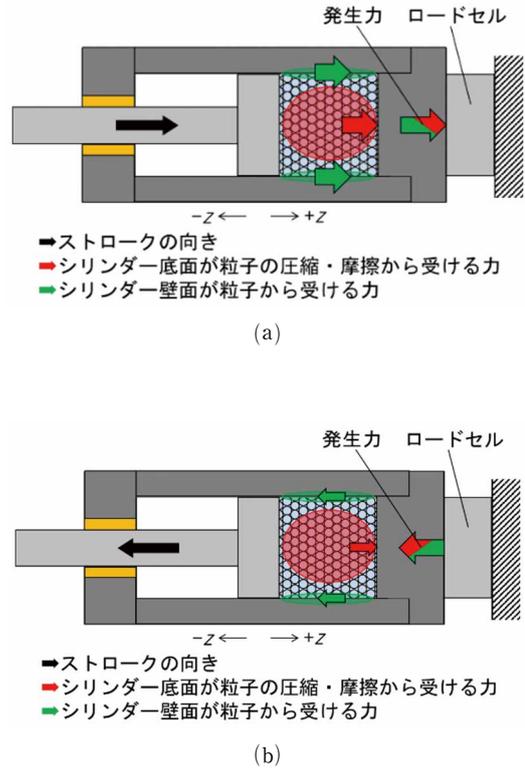


図5 z 軸方向に生じる発生力
(a) 正の変位, (b) 負の変位

2.2.5 発生力および法線・接線方向力

シミュレーション結果として、図6に基準条件での発生力および発生力の法線方向成分（以降、法線方向力）、接線方向成分（以降、接線方向力）-変位曲線、図7に同条件での速度曲線を示す。以降、データは1周期分をプロットし、変位はピストン変位、波形の時間進行は変位曲線では時計回り、速度曲線では反時計回りとなっている。

図6から、発生力は粒子を圧縮する向きに変位が進む（以下、圧縮過程とする）につれて大きくなる漸硬型の特性を示しており、ピストンが粒子の圧縮と逆の向きに変位が進む（以下、戻り過程とする）際は、発生力にヒステリシスが生じているのがわかる。漸硬型の特性を示すのは、粒子の圧縮により生

じる弾性反発力の影響が考えられ、ヒステリシスが生じる原因としては、エラストマ粒子の変形による粘性や、粒子間および粒子壁面間の摩擦による影響が考えられる。

続いて法線方向力と接線方向力について考察する。法線方向力は主に粒子が圧縮される時に生成される抵抗力が影響し、接線方向力は粒子間および粒子壁面間で生成されるせん断力と、粒子が移動する際に発生する粒子間および粒子壁面間の抵抗力が影響する。

図6から、圧縮過程では法線方向力と接線方向力は漸硬型の特徴となっている。また、法線方向力は接線方向力より最大値は大きいがヒステリシスは小さくなっている。この時、図7で法線方向力が概ね速度0 m/sで最大となっていることから、法線方向の粒子の圧縮変形による粘性成分の影響が非常に小さいため、漸硬型でヒステリシスが小さくなったと考えられる。これは、法線方向力は粒子の圧縮による弾性力が主体であると言い換えることができる。接線方向力も漸硬型だが、ヒステリシスが大きく、戻り過程では負の値となり、変位の進行と共に力は小さくなっている。ヒステリシスに影響を与える粘性成分は速度に依存するが、図7から速度0 m/s付近で力が最大となっているため、接線方向力は粘性の影響が小さいと考えられる。また、力が圧縮過程の開始点である変位 - 5 mmで0 Nに収束していることから、接線方向力は法線方向力が垂直抗力として影響する摩擦力が主体となっており、摩擦力は変位の向きで正負の符号が切り替わるため、戻り過程では負の値となり、ヒステリシスが大きくなっていると考えられる。ここで生じる摩擦力は、粒子とシリンダ壁面との間で生じる滑りによる摩擦力である。

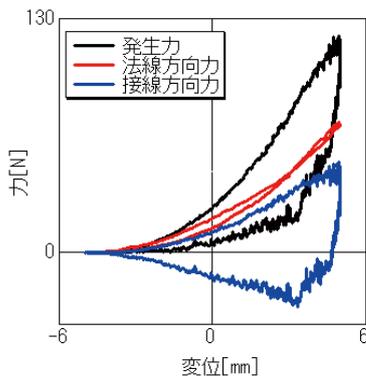


図6 発生力・法線・接線方向力-変位曲線

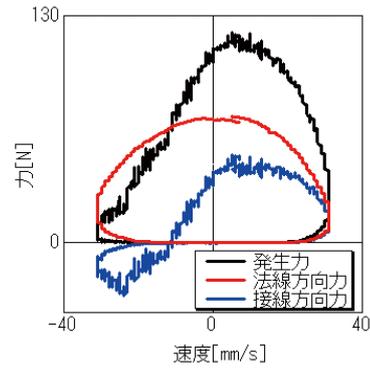


図7 発生力・法線・接線方向力-速度曲線

2.2.6 法線・接線方向の弾性力・粘性力

前項で示した、法線方向力は弾性力が主体であり、接線方向力は摩擦力が主体である、という考察を検証するため、それぞれの力を弾性力と粘性力に分けて検証する。図8は法線方向力を弾性力、粘性力に分離した曲線、図9は図8の粘性力を拡大した曲線、図10は接線方向力を弾性力、粘性力に分離した曲線である。

図8から、法線方向力は弾性力と概ね一致しているため、粒子の圧縮変形による弾性反発力が支配的であることがわかる。ただし、粘性力の値は0ではなく、図9のように拡大すると微小だが力が発生していることがわかる。また、図10から、接線方向力では粒子とシリンダ壁面との間で粒子のせん断変形による弾性力と粘性力は生じておらず、粒子とシリンダ壁面間の摩擦力のみで構成されており、常に滑りが生じていることがわかる。

以上より、発生力には粒子の圧縮変形により生じる法線方向の弾性力と、粒子とシリンダ壁面間との接線方向の摩擦力が大きく影響していることがわかった。

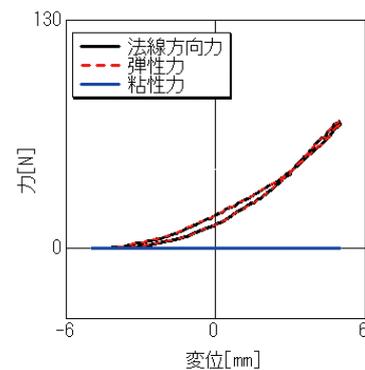


図8 法線方向力・弾性力・粘性力-変位曲線

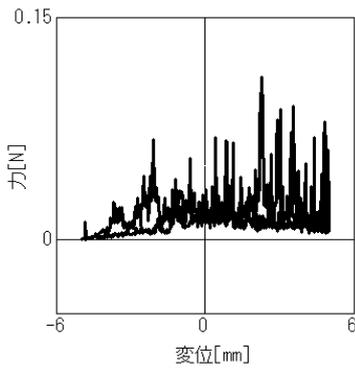


図9 法線方向粘性力-変位曲線拡大

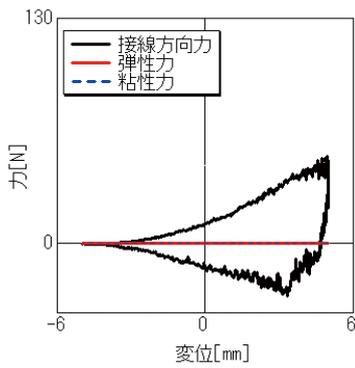


図10 接線方向力・弾性力・粘性力-変位曲線

2.2.7 粒子の圧縮力分布

発生力には法線方向の弾性力が大きな影響を与えるため、基準条件でのダンパ内の各粒子に働く圧縮力の影響を確認した。図11の(a)から(d)は図1のA-A断面から見たダンパ内のピストンおよび粒子の位置と、粒子の圧縮力の分布であり、図中の粒子に加わる圧縮力は法線方向の弾性力である。

図11(a)から、圧縮過程ではピストン周辺に圧縮力の大きい粒子が多く、粒子の圧縮によってピストンに加わる反発力が強くなることがわかる。ただし、シリンダ底側は圧縮力の小さい粒子が多いため、ピストン側の粒子の圧縮力はシリンダの底側に十分に伝達されていないと考えられる。また、図11(c)から、戻り過程ではピストン周辺に圧縮力の小さい粒子が多く、粒子からピストンへの反発力が小さくなる。ただし、シリンダ底面側は圧縮力の高い粒子が多いため、シリンダ底面側の粒子の圧縮力はピストンに十分に伝達されていないと考えられる。これらから、ピストンの強制加振に対して粒子の変形による力の伝達に遅れが生じていると考えられる。

圧縮過程では粒子間の圧縮力および粒子をシリンダ壁面に押し付ける力、これらの力が垂直抗力として作用する摩擦力が増加し、シリンダ底面に作用する力が増加する。一方、戻り過程では粒子間の圧縮

力や粒子が壁面に押し付けられる力が小さくなり、摩擦力も小さくなる。このとき、シリンダ底面に加わる力は、粒子の圧縮反発力と摩擦力を足したものであり、摩擦力は圧縮過程と戻り過程では正負の符号が反転するため、圧縮過程と戻り過程では同変位において発生力に差が生じることとなる。以上から、力の伝達の遅れと摩擦力は発生力がヒステリシスを持つ原因の一つであることがわかる。

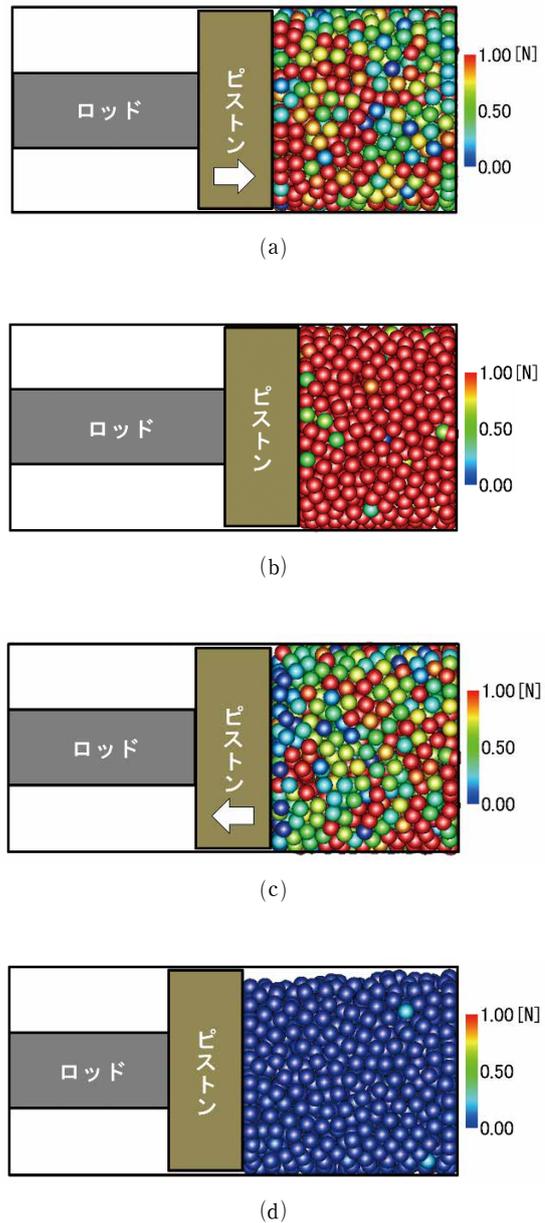


図11 圧縮力分布

- (a) 圧縮過程, $z = 0$,
- (b) $z = 5$,
- (c) 戻り過程, $z = 0$,
- (d) $z = -5$

2.2.8 実験・シミュレーション結果比較

シミュレーションの妥当性の検証および条件を変更した場合の発生力の特徴を確認するため、条件違

いでの実験および実験結果とシミュレーション結果の比較を行った。図12から図16に基準条件および基準条件から充填率、加振周波数、粒子材質、粒子径を変更した場合の発生力-変位曲線の実験結果とシミュレーション結果を示す。粒子材質の条件では、粒子のヤング率のみ変更している。

図12から図16より、各条件でシミュレーション結果は実験結果と定性的、定量的に良く一致しているのがわかる。また、発生力は充填率や加振周波数、粒子材質、粒子径に関係なく、基準条件と同様に圧縮過程では漸硬型で、圧縮過程から戻り過程に切り替わると、ヒステリシスが生じているのがわかる。

各条件での発生力の変化の度合いとしては、図12から図16より、充填率、材質に影響するヤング率により最大値やヒステリシスは大きく変化し、加振速度や粒子径では変化の度合いは小さいことがわかる。加振速度の影響が小さい理由は、シミュレーション結果より粘性力の影響が非常に小さいためである。粒子径の影響が小さい理由としては、粒子径を大きくすると変位による粒子の変形量は大きくなるが、粒子数が減少しシリンダと粒子間の摩擦が小さくなるため、発生力の変化が小さくなったと考えられる。

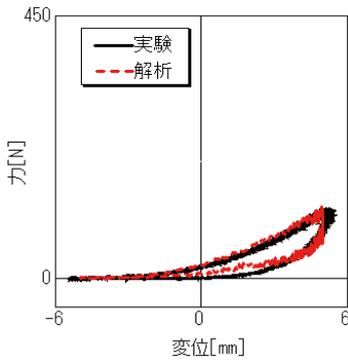


図12 発生力-変位曲線 実験・シミュレーション比較
基準条件 (充填率0.60, 加振周波数 1 Hz,
ヤング率4.08MPa, 粒子径 ϕ 3 mm)

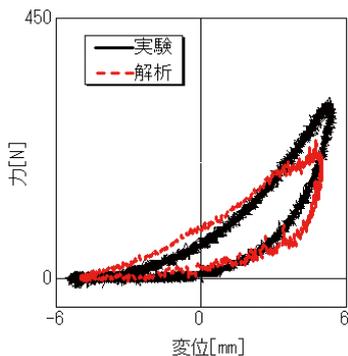


図13 発生力-変位曲線 実験・シミュレーション比較
充填率変更 (0.70)

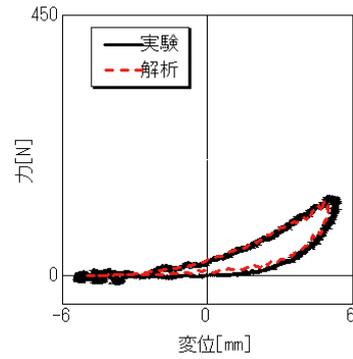


図14 発生力-変位曲線 実験・シミュレーション比較
加振周波数変更 (5 Hz)

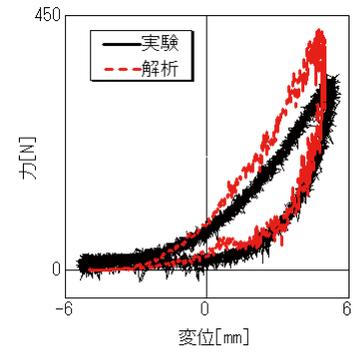


図15 発生力-変位曲線 実験・シミュレーション比較
材質変更 (ヤング率17.6MPa)

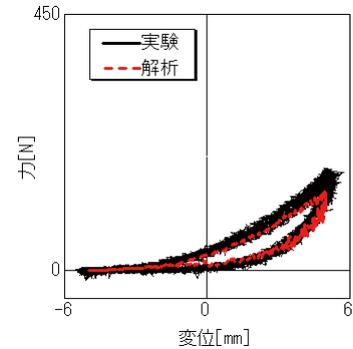


図16 発生力-変位曲線 実験・シミュレーション比較
粒子径変更 (ϕ 5 mm)

各条件で発生力の特徴が定性的に同じであることから、ダンパ内の粒子の挙動も概ね同じであると考えられる。以上より、シミュレーションは実験での現象を良く再現できていると言える。

3 両室に粒子を充填した場合の発生力特性

3.1 ダンパ構造

シミュレーションおよび実験で使用するダンパの概略構造を図17に示す。第2章との違いは、ピストンによって分けられた二室の両室に粒子が充填され

ていることのみである。また、両室に粒子を充填した場合には、ロッドが無い方の部屋をChamber A、ロッドがある方の部屋をChamber Bとしている。

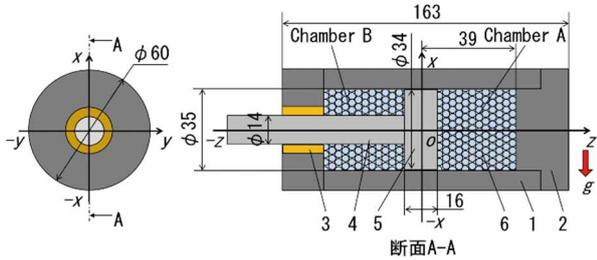


図17 ダンパ構造

1. シリンダ, 2. エンドカバー, 3. ベアリング,
 4. ロッド, 5. ピストン, 6. エラストマ粒子,
- 単位: mm

3.2 シミュレーション・実験

3.2.1 シミュレーション・実験条件

シミュレーション条件を表3、実験条件を表4に示す。シミュレーションに用いた手法や基礎方程式、実験条件等は第2章と同様である。第2章で発生力の特性は概ね確認できているため、本章でのシミュレーションと実験は第2章での基準条件のみ行う。

表3 シミュレーション条件

粒子材質	シリコンゴム (TSE3466)
粒子径 [mm]	3
充填率 [-]	0.60
粒子数	2533
ストローク量 [mm]	10
加振周波数 [Hz]	1
時間刻み [s]	5.0×10^{-9}
加振波形	Sin波
粒子密度 [kg/m ³]	1.10×10^3
粒子ポアソン比 ν_i	0.5
摩擦係数 μ_f (壁面-粒子)	0.5
摩擦係数 μ_f (粒子-粒子)	0.5
ヤング率 E_w [GPa] (壁面)	210
ヤング率 E_i [MPa] (粒子)	4.08 (TSE3466)
粘性係数 α	0.5311

表4 実験条件

粒子材質	シリコンゴム (TSE3466)
ヤング率 E_i [MPa] (粒子)	4.08 (TSE3466)
粒子径 [mm]	3
充填率 [-]	0.60
ストローク量 [mm]	10
加振周波数 [Hz]	1

3.2.2 発生力の算出方法

両室充填でのシミュレーションは、図18のように、ピストンが粒子を圧縮した時にシリンダ底面に伝わる z 軸方向の圧縮力と、粒子とシリンダ壁面との間の z 軸方向の摩擦力の合計値をシリンダ底面に加わる力 D_z としている。また、図19のように、ピストンが粒子を圧縮した時にロッド端面に伝わる z 軸方向の圧縮反力と、ロッド壁面と粒子との z 軸方向の摩擦力の合計値をロッド端面に加わる力 R_z としている。この時、 D_z と R_z は力がつり合っている。

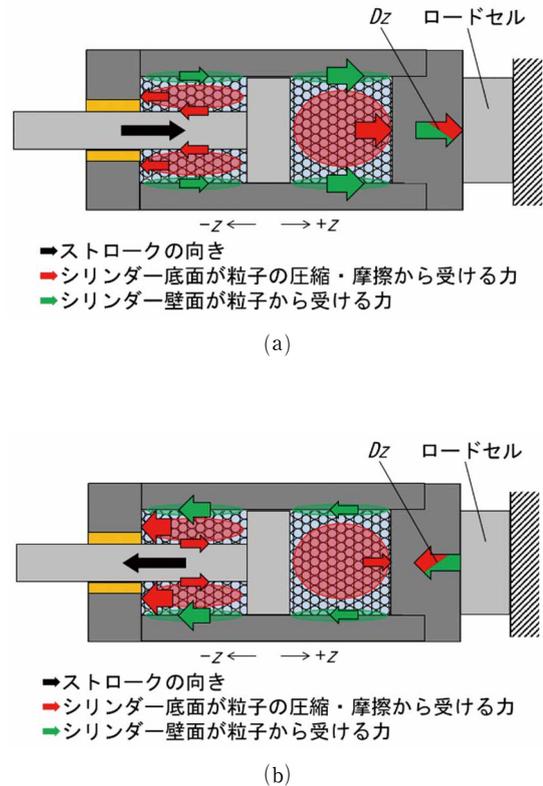


図18 シリンダ底面に加えられる z 軸方向の力
(a) 正の変位, (b) 負の変位

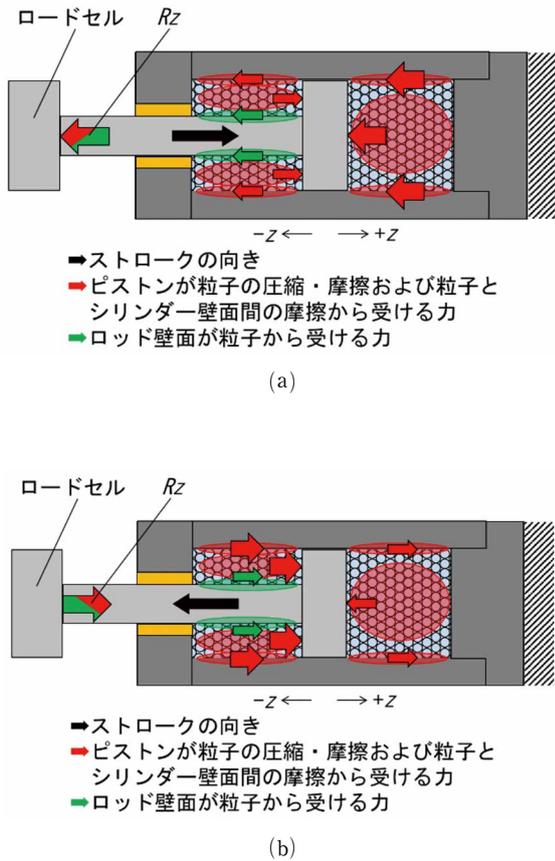


図19 ロッド端面に加えられる z 軸方向の力
(a) 正の変位, (b) 負の変位

発生力の法線方向成分の力は、粒子の圧縮変形により生じる粘弾性によるものであり、接線方向成分の力は粒子のせん断変形による粘弾性と、粒子とシリンダもしくはロッド壁面間での滑り摩擦によるものとなる。これにより、 D_z は粒子とシリンダ壁面間の摩擦力、 R_z は粒子とロッド壁面間の摩擦力を確認することができるようになっている。

3.2.3 発生力および発生力の分解

図18に示したように、シリンダの壁面に加わる力に着目し、シミュレーションを行った。シミュレーション結果として、図20に基準条件での変位に対する発生力 D_z および D_z のシリンダ壁面に加わる接線方向の力と残りの力、図21に同条件での速度に対する力を示す。残りの力とは、 D_z からシリンダ壁面に加わる接線方向の力を引いた力である。図20から、発生力は硬化型を示し、変位の向きが切り替わるとヒステリシスを有することがわかる。また、主に Chamber B側の粒子が圧縮される負の変位で生じる最大発生力は、Chamber Aの粒子が主に圧縮される正の変位で生じる最大発生力よりも大きくなっており、発生力の波形は原点に対して非対称な形となっている。片室充填時と同様に、漸硬型の特性を示すのは粒子の圧縮により生じる弾性反発力の影響

が考えられ、ヒステリシスが生じる原因はエラストマ粒子の変形による粘性や、粒子間および粒子壁面間の摩擦による影響が考えられる。また、波形が非線形になるのは、Chamber Bにはロッドがあり、Chamber B側に変位が進むことでロッドと粒子の摩擦が大きくなっていくためと考えられる。

続いてシリンダ壁面に加わる力と残りの力を用いて発生力の特性を考察する。図20から、変位が各向きに進むとシリンダ壁面に加わる力と残りの力の両方が増加することがわかる。この時、シリンダ壁面に加わる力は変位の向きの切り替わりから急激に力が上昇し、ある変位からは緩やかに力が上昇する漸硬型の特性となるのに対し、残りの力は常に漸硬型の特性を示す。このため、ヒステリシスはシリンダ壁面に加わる力の影響が大きく、発生力の最大値はシリンダ壁面に加わる力と残りの力で同程度の影響度合いとなっている。ここで、図18のように、ロッドの無い側のシリンダ底面に加わる発生力は、ピストンが粒子を圧縮した際に受ける法線方向の圧縮力およびロッド壁面と粒子との接線方向の摩擦力と、シリンダ壁面と粒子との接線方向の摩擦力から成ると考えられる。発生力の波形が原点に対して非対称であることについては、Chamber Bにあるロッドと粒子の接触力による影響と考えられるが、これについては発生力 R_z の結果にて検証する。

また、図21から、発生力および法線方向力、接線方向力の最大値が速度0 m/sから少しずれていることがわかる。粘性の影響が無い場合、力-変位曲線は速度0 m/sで最大となることや、式(6)と式(7)から速度の影響を受けるのは法線方向と接線方向の粘性のみであるため、粘性の影響で発生力の最大値が速度0 m/sから少しずれたと考えられる。

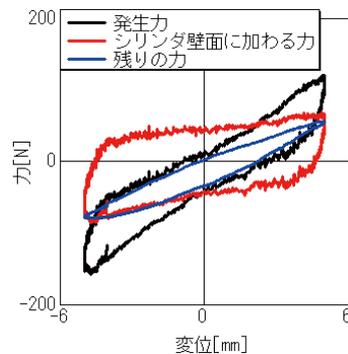


図20 発生力 D_z ・シリンダ壁面に加わる力、残りの力-変位曲線

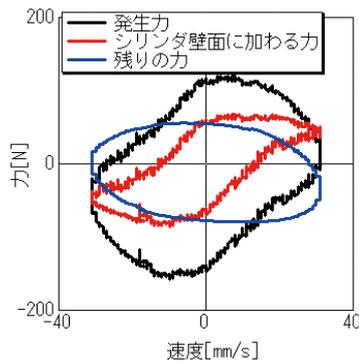


図21 発生力 D_2 ・シリンダ壁面に加わる力，残りの力-速度曲線

次に，図19に示したように，ロッドの壁面に加わる力に着目し，シミュレーションを行った．図22に基準条件での変位に対する発生力 R_2 および R_2 のロッド壁面に加わる接線方向の力と残りの力を示す．残りの力とは， R_2 からロッド壁面に加わる接線方向の力を引いた力である． D_2 と異なる点としては，図22のロッド壁面に加わる力は負の変位で漸硬型となり，正側に変位が進むとある変位までは上昇し，その後は概ね0Nになるまでなだらかに減少する．また，残りの力が発生力と概ね同じ特性で，変位量が負の領域で発生力とのずれが大きくなっている．ロッド壁面に加わる力は負側の変位によるChamber Bの粒子圧縮量の増加により，それが垂直抗力として作用するロッドと粒子間の摩擦力も大きくなっていくため漸硬型を示し，正側の変位ではChamber Bの粒子圧縮量が減少していくため，ロッドと粒子間の摩擦力も小さくなっていくと考えられる．さらに，このロッド壁面に加わる力の影響で発生力が原点に対して非対称になっていることがわかる．また，残りの力の漸硬型特性は粒子の圧縮反発力およびそれが垂直抗力として作用するシリンダと粒子間の摩擦力によるもので，ヒステリシスはシリンダと粒子間の摩擦力によるものと考えられる．

ここで，図20のシリンダ壁面に加わる力と図22のロッド壁面に加わる力を比較すると，ロッド壁面に加わる力の方が小さいことがわかる．これは，シリンダの内径よりロッドの外径の方が小さい，すなわちロッド外周部の表面積が小さいため，ロッドが粒子から受ける摩擦の影響はシリンダが受ける影響よりも小さくなるためであると考えられる．

以上より， D_2 と R_2 に関する考察をまとめると，発生力はChamber Aでは主にピストンが粒子を圧縮した際に生じる法線方向の反発力およびシリンダと粒子間で生じる接線方向の摩擦力から成り，Chamber Bではさらにロッドと粒子間で生じる接

線方向の摩擦力が加わることにより生成される．また，図21から発生力およびシリンダ壁面に加わる力と残りの力は最大値が速度0 m/sからずれているため，それぞれがエラストマ粒子が持つ粘性の影響を受けていることがわかる．

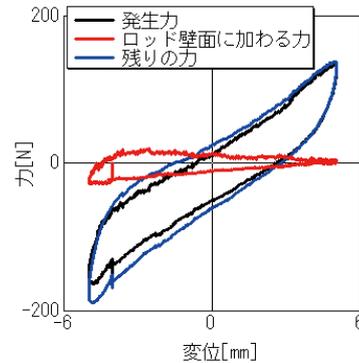


図22 発生力 R_2 ・ロッド壁面に加わる力，残りの力-変位曲線

3.2.4 発生力のシリンダもしくはロッド壁面に加わる力と残りの力の弾性力・粘性力

前項で示した，粘性の影響等を検証するため，発生力のシリンダもしくはロッド壁面に加わる力と残りの力を弾性力，粘性力に分離した．

図23は D_2 のシリンダ壁面に加わる力を弾性力と粘性力に分離した曲線，図24は D_2 の残りの力を弾性力と粘性力に分離した曲線，図25は図24の粘性力を拡大した曲線である．

図23から，シリンダ壁面に加わる力はシリンダと粒子間の摩擦力のみで構成されており，粒子のせん断変形における弾性力と粘性力は生じないことがわかる．これにより，片室充填の接線方向の場合と同様に，接線方向ではシリンダと粒子間は常に滑りが生じていることがわかる．図24から，残りの力は弾性力が支配的で，弾性力は漸硬型でヒステリシスを有する特性であり，残りの力と弾性力は概ね一致することがわかる．したがって，片室充填の法線方向力と同様に，残りの力は粒子の圧縮変形による弾性反発力が支配的であり，粒子が変形する際に生じる粘性力の影響は非常に小さい．ここで，片室充填の法線方向力と異なり，弾性力がヒステリシスを有しているのは，ダンパの各部屋での全充填粒子による弾性係数が異なるためと，図18よりロッドと粒子間の摩擦力を含んでいるためである．そのため，正確には弾性力ではないが，ここでは弾性力と呼ぶことにする．また，粘性力の値は0ではなく，図25より微小だが力が発生していることがわかる．

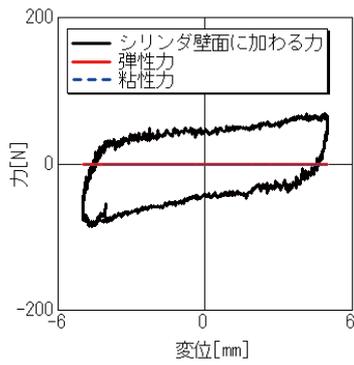


図23 発生力 D_2 のシリンダ壁面に加わる力・弾性力・粘性力-変位曲線

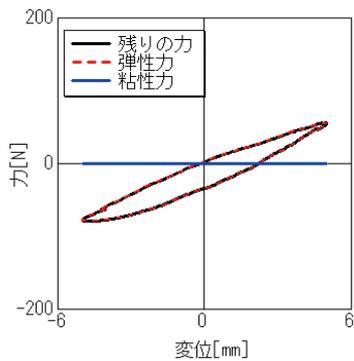


図24 発生力 D_2 の残りの力・弾性力・粘性力-変位曲線

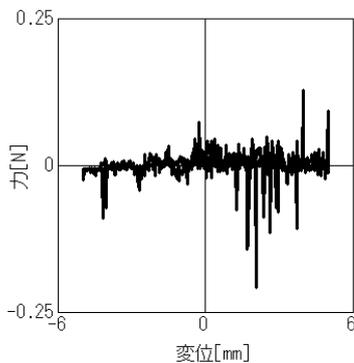


図25 図24残りの力の粘性力-変位曲線拡大

図26に R_2 のロッド壁面に加わる力を弾性力と粘性力に分離した曲線，図27に R_2 の残りの力を弾性力と粘性力に分離した曲線，図28に図27の粘性力を拡大した曲線を示す。

図26から，ロッド壁面に加わる力も D_2 と同様，ロッドと粒子間の摩擦力のみで構成されており，粒子の変形による弾性力と粘性力は生じないことがわかる。したがって，ロッドと粒子間は常に滑りが生じていることがわかる。図27から， D_2 と同様，残りの力は弾性力が支配的で，弾性力は漸硬型でヒステリシスを有する特性であり，残りの力と弾性力は概ね一致

することがわかる。ここで，図19から，図27の弾性力は粒子を圧縮変形した際の弾性反発力と，シリンダと粒子間の摩擦力で構成されるため，正確には弾性力ではないが，シリンダ壁面に加わる力と残りの力の場合と同様に，ここでは弾性力と呼ぶことにする。この弾性力がヒステリシスを持つ理由としては， D_2 と同様，ロッド有無の影響でそれぞれのChamberで異なる非線形の弾性係数を有することと，図19よりシリンダと粒子間の摩擦力を含んでいるためである。図28より，粘性力は D_2 と同様に微小だが生じていることがわかる。

ここで，円柱状等のエラストマの塊を圧縮する場合の反発力特性と本ダンパの発生力特性の違いを考察する。円柱状のエラストマは，圧縮すると発生力は変位に依存しヒステリシスを有する粘弾性特性を示すものが多い。これに対し，本ダンパではシリンダやロッドの壁面と粒子との摩擦が生じ，発生力に大きな影響を与える。これにより，同体積のエラストマの塊を圧縮した場合の特性と比較すると，本ダンパの発生力はヒステリシスが大きくなると考えられる。

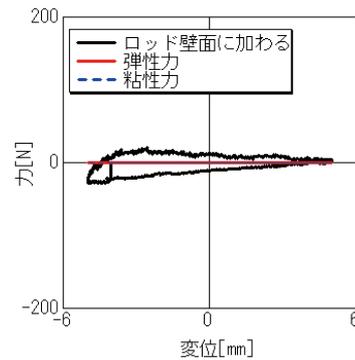


図26 発生力 R_2 のロッド壁面に加わる力・弾性力・粘性力-変位曲線

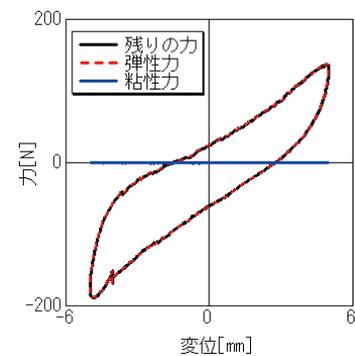


図27 発生力 R_2 の残りの力・弾性力・粘性力-変位曲線

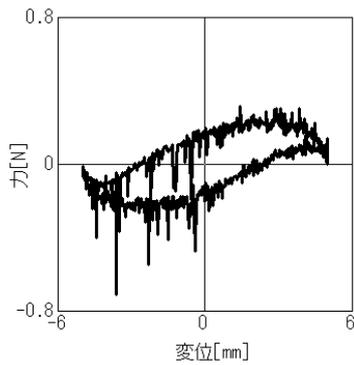


図28 図27残りの力の粘性力-変位曲線拡大

3.2.5 粒子の圧縮力分布

片室充填と同様、発生力 D_2 にはシリンダ壁面に加わる力以外の力、すなわち主に法線方向の弾性力が大きな影響を与えるため、ダンパ内の各粒子に働く圧縮力の影響を確認した。図29(a)から(d)は図17のA-A断面から見たダンパ内のピストンおよび粒子の位置と、粒子の圧縮力の分布であり、図中の粒子に加わる圧縮力は法線方向の弾性力である。

図29(a)から、ピストンが正側に変位すると、Chamber Aではピストン周辺で圧縮力の大きい粒子が多く、シリンダ底面側では圧縮力の小さい粒子が多いことがわかる。この時、Chamber B内ではピストン周辺で圧縮力の小さい粒子が多く、シリンダ底面側で圧縮力の大きい粒子が多い。これは、ピストンが正側に変位すると、Chamber Aの粒子がピストンに与える力が大きくなることを示しており、この時、Chamber Bはピストンに加わる力が低下している。これは、図29(c)から反対の向きでも同様の傾向であることがわかる。ただし、図29(a)と(c)を比較すると、図29(c)のChamber Bの方が図29(a)のChamber Aより圧縮力の大きい粒子が多く、図29(c)のChamber Aの方が図29(a)のChamber Bより圧縮力の小さい粒子が多い。このため、Chamber B側の負側に変位した時に粒子に働く圧縮力の影響の方が大きいことがわかる。Chamber Bの内容積がロッドの体積分だけChamber Aより小さいため、粒子の逃げ場がなく、粒子の圧縮がChamber Aよりも小さい変位で始まるためであると考えられる。また、片室充填の場合と同様に、粒子の変形による力の伝達に遅れも確認できる。

3.2.6 実験・シミュレーション結果比較

シミュレーションの妥当性を検証するため、実験および実験結果とシミュレーション結果の比較を行った。図30に発生力-変位曲線の実験結果とシミュレーション結果を示す。

図30から、シミュレーション結果は実験結果と定

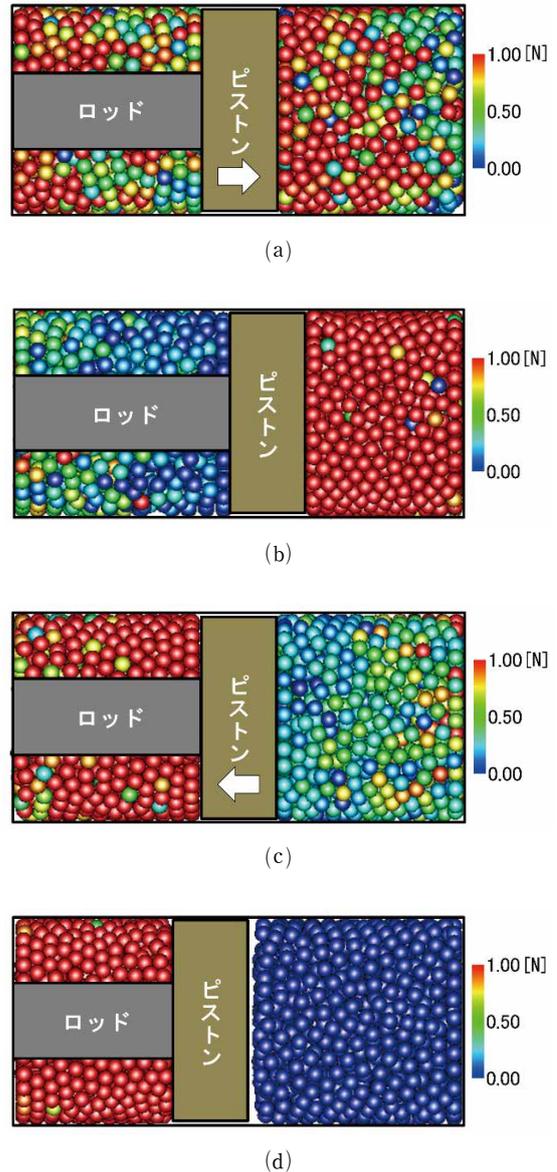


図29 圧縮力分布

- (a) 圧縮過程, $z = 0$,
- (b) $z = 5$,
- (c) 戻り過程, $z = 0$,
- (d) $z = -5$

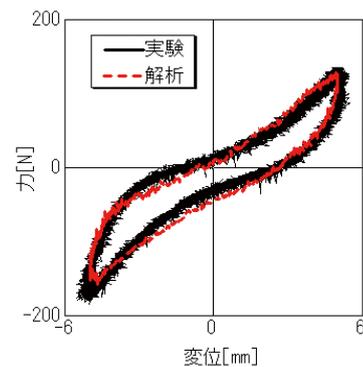


図30 発生力-変位曲線 実験・シミュレーション比較

性的、定量的に良く一致しているのがわかる。以上より、片室充填と同様、シミュレーションは実験での現象を良く再現できていると言える。

4 結言

本報では、エラストマ粒子を用いた二室セパレート型片出し粒状体ダンパにて、片室および両室に粒子を充填した場合の発生力特性および力の生成要因を明らかにするため、調査、考察を行った。

片室に粒子を充填した場合は、発生力はヒステリシスを持つ漸硬型の特性を有し、法線方向の弾性力と接線方向の摩擦力の影響を大きく受ける。この時の弾性力は粒子が圧縮されることによって生じる圧縮反発力が主体的であり、摩擦力はシリンダと粒子間での滑り摩擦によって生じる。また、充填率、加振周波数、粒子材質に影響するヤング率および粒子径を大きくすると、最大発生力、ヒステリシスが增加する。特に充填率とヤング率の影響が大きい。

両室に粒子を充填した場合は、片室充填と同様、発生力はヒステリシスを持つ漸硬型の特性を有し、接線方向のシリンダおよびロッド壁面に加わる摩擦力とそれ以外の力に含まれる弾性力の影響を受ける。また、ロッド壁面に加わる摩擦力により、発生力の曲線は原点に対して非対称となっている。

片室および両室充填でのDEMによるシミュレーション結果は、実験結果と定性的および定量的に良く一致しており、シミュレーションは実験での現象を良く再現できている。

以上より、発生力特性および力の生成要因を明らかにすることができた。

今後の課題としては、本報では発生力の波形や粒子の圧縮力分布等による考察が主であるため、解析での粒子の弾性係数の変化量や粒子変形量等を追い、解析に使用した計算式と結び付けて検証することで考察の精度を高める必要がある。また、製品適用を検討する際には、ピストン径や粒子室長等のサイズによる発生力変化も把握し、他ダンパと比較した場合のメリット、デメリットを明確にする必要がある。

注) 本報は、名古屋工業大学2020年度博士学位論文『エラストマ粒子を用いた二室セパレート型片出し粒状体ダンパの生成力特性』を再編集したものである。

参考文献

- 1) Y. Ido, K. Hayashi, Damping force of damper utilizing a spherical particle assemblage, Proceedings of 15th International Conference on Experimental Mechanics, 2012, Paper ref: 2714.
- 2) Y. Morishita, Y. Ido, K. Maekawa, A. Toyouchi, Basic damping property of a double rod type damper utilizing an elastomer particle assemblage, Advanced Experimental Mechanics, Vol. 1, 2016, pp. 93-98.
- 3) P.A. Cundall, O.D.L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, Géotechnique, Vol. 29 Issue 1, 1979, pp. 47-65.
- 4) R.D. Mindlin, Compliance of elastic bodies in contact, Transaction of ASME, Series E, Journal of Applied Mechanics, Vol. 16 1949, pp. 259-268.
- 5) The Japan Society of Mechanical Engineers, JSME Mechanical Engineers' Handbook, Vol. 6, 1977, pp. 3-34, Maruzen Publishing Co., Ltd.

著者



豊内 敦士

2009年入社。オートモーティブコンポーネツ事業本部技術統轄部開発センター製品開発室。
粒状体ダンパの研究開発に従事。