振動式粉粒体試験機の開発*

佐藤 宗武**, 小村 修司**
宮 南 啓**

Development of a Vibration Type Powder Tester

by

Munetake SATOH[†], Shuji KOMURA[†] and Kei MIYANAMI[†]

A new type of a system for measuring the dynamic physical properties of a solid particles bed by using a vibration method has been developed. The system consists of an electromagnetic vibrator with a controller for the frequency and the acceleration, a detecting sphere body attached to the movable plate suspended by copper wires from the main frame, and transducers of force and displacement. The detecting sphere is traversed horizontally in the particles bed at a constant rate, and the characteristic curves for several samples have been measured as the relationship between the tensile strength and the frequency under the condition of constant acceleration. It has been shown that the packing state of the particles bed is loosened by vibration at the characteristic frequency, and the mixing time of a mechanical agitation type mixer with a vibrator indicates a minimum value at this frequency.

1. 緒 言

粉粒体の流動性などの動的な物性は粒子径、粒度分布、密度、形状、表面状態等々の粒子自体の持つ固有の物性に支配されると同時に粒子群の置かれている力学的な場にも影響される。振動場における粉粒体の流動化あるいは充てん現象は古くから注目されており各種の粉粒体プロセスにも応用されている。このような粉粒体の物性変化は、周波数、加速度、振幅などの加振条件によって影響され、従来から安息角の時間変化¹⁾、オリフィスからの流出速度²⁾、導電性粒子層の伝導度変化^{3,4)}、回転型粘度計による剪断抵抗^{5,6)}、粒子層中の球体の垂直移動に伴う抵抗力⁷⁾など種々の特性を測定することによって物性と振動の関係を明らかにする試みがなされている。振動中の粉粒体層中に測定のために何からの物体を挿入すると物体の周辺部および全体への振動の伝播様式が変化してしまい正しく振動物性を評価することが難しい場合がある。ここでは、でき

るだけ検出子の周囲の流動を乱さず粉粒体から受ける力が均一に作用するように球体を用いて振動方向（垂直）と直角方向（水平）に定速度で移動させたときの抵抗力を検出できる一種の引張力測定装置を試作した。加速度を一定に制御した条件で周波数を種々変化させて数種類の粉粒体試料を用いて球体の引張抵抗を測定し本装置の特性を検討した。

2. 実験装置および方法

試作した加振型引張力測定装置の概略をFig. 1に示した。装置は、加振機とその駆動制御系、吊り下げ式可動台と駆動モータおよび応力測定部から構成されており、粉粒体層中での球体の移動距離と力の関係を加振条件をパラメータとして記録するようになっている。

2.1 加振部と制御系

振動操作において周波数、振幅、加速度を広い範囲にわたって独立に変化させるには加振機の構造や駆動制御部がかなり複雑になると共に高い周波数になるほど実現が困難になる。本装置では電磁式加振機（最大負荷 5 kg, 最大振動強度 30 G, 最大振幅 ± 4 mm, 周波数範囲 5 ~ 8000 Hz）を周波数および載荷荷重が変化しても加速度を一定に保つような制御系（Fig. 2）を用いて駆動した。制御系はブロック線図で示したよう

昭和 60 年 3 月 20 日受理

* 粉体工学会春期研究会(1984. 5, 大阪)にて発表

** 大阪府立大学工学部化学工学科(〒590 堺市百舌鳥梅町4丁804)
TEL 0722-52-1161

† Department of Chemical Engineering, University of
Osaka Prefecture, Sakai

Fig. 1 Schematic diagram of the vibration type powder tester

Fig. 2 Control system for the frequency and acceleration

に、正弦、三角および矩形の波形を発生する低周波発振器⑧、加速度ピックアップ(歪ゲージ式と圧電式⑨)、加速度制御系⑩⑪および加速度一定の条件で周波数を連続的に変化させる周波数掃引系⑫から成っている。

2.2 測定セルおよび応力検出部

測定セル⑬は内径 40 mm 深さ 52 mm および内径 80 mm 深さ 90 mm の円筒容器で加振機の中央に取り付けた。粉粒体層中を移動させる球体⑭は直径 19.7 mm で、4 本の軟銅線(長さ 30 cm)によって水平に吊された可動台⑮に支柱を介して固定されている。可動台は応力検出部⑯を挟んで駆動モータにナイロン線で接続され、引張り変位は電気式ダイヤルゲージ⑰で測定さ

Fig. 3 Structure of the strain gauge type force transducer

Fig. 4 Calibration lines of the force transducer

れる。応力検出部の詳細はFig. 3 に示すような金属棒に短冊状のバネ片を付け、両面に抵抗線歪ゲージを貼付けた構造で、応力に応じて燐青銅または鋼板を使用し、棒全体を銅線で吊してある。使用したバネ片の応力と歪はFig. 4 のように良好な直線関係を示し、0.003 N から約 5 N まで測定可能である。球の移動距離 δ と抵抗力 F の関係はXY 記録計で連続記録され、同時に加速度および駆動波形がシンクロスコープでモニターできるようになっている。なお、可動部分の総質量は約 500 g であるが共振点を避けるために約 1.5 kg までの载荷が可能であり、これらの荷重を含む空抵抗(粉粒体をセルに充てんしない状態)は引き算回路によりあらかじめ補正できるようにした。

2.3 粉粒体試料および測定条件

使用した粉粒体試料の種類と代表性値をTable 1 に示した。実験は測定セル中に試料を高さ 40 mm まで装入し、球の中心が試料表面から 20 mm の深さになる

Table 1 Physical properties of solid particles

material	diameter	density	bulk density	angle of repose
	d_p [μm]	ρ [kg/m^3]	ρ_a [kg/m^3]	ϕ [deg]
glass powder	150–300	2500	1420	40
calcium carbonate (CaCO_3)	3.60 *	2700	590	43
aluminum oxide (Al_2O_3)	125–210	4010	1820	39

*) mean diameter

ように設定した。加速度一定の条件で球を 0.325 mm/s の定速度で移動させた場合の各振動周波数 f [Hz] に対する引張力 F [N] の関係を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 測定部の特性

製作した加振機駆動アンプおよび制御装置の性能を確かめるために振動周波数を 15 から 500 Hz の間で連続掃引した場合の加振機自体の加速度を変化を **Fig. 5** に示した。制御装置を用いることによって周波数を変化させても加速度が一定に保たれていることが確かめられた。**Fig. 6** には可動台と検出球のみを定速度で移動させた場合、および、直径 40 mm のセルに所定量のガラス粒子を装入し正弦波で 30 Hz, 2 G で加振しつつ球を移動させた場合についての球移動距離 δ と引張り抵抗力 F との関係を示した。測定部の自重による抵抗力は移動距離に対して比例して増加しており、この分の力は引き算回路により処理した。粉粒体層中の抵抗力は球がセルの壁面を離れるにしたがって増加し約 2 mm 以上離れると増加率が一定、すなわち一定の抵抗力を示す領域が存在した。さらに移動して球が他端の壁に近づくとき粉粒体を圧縮する状態にな

Fig. 5 Characteristics of the vibrator using the acceleration controller **Fig. 6** Typical result of the tensile test for the vibrating particles bed

り抵抗力が増大する。直径 80 mm のセルを用いた場合にも球の移動に伴う抵抗力の変化の傾向は同様で、抵抗力一定の範囲が広がった。粉粒体層高を等しくするとこの範囲の抵抗力の値が 40 mm セルの場合にはほぼ等しい値を示した。そこで、ここでは抵抗力が一定になる領域の値をそのときの周波数、加速度における代表値とした。

3.2 抵抗力に及ぼす周波数の影響

Fig. 7 にガラス粉末、アルミナおよび炭酸カルシウムを加速が一定の条件下で測定したときの引張抵抗力 F と周波数 f との関係を示した。比較的流動性の良好なガラス粉末では 20 Hz 付近に F のピークがあり圧密状態を示す。一方、30 から 40 Hz の間には F の極小値を示すところが存在し流動化状態にあることがわかる。アルミナではこの周波数特性曲線の形がやや高周

Fig. 7 Relationship between the tensile force and the frequency

Fig. 8 Comparison of the propagation stress through the particles bed and the tensile force

波側に寄り、微粉の炭酸カルシウムでは振動によって圧密の傾向が強くなるものの100および170 Hzのところでピークと極小値が見られる。このように周波数-応力の特性曲線は粉粒体の種類により特徴ある形を示した。この周波数による粉粒体層の充てん状態の変化を確かめるために可動台と球体との間にロードセルを取り付け、測定セル中央部における振動の伝播応力および波形を周波数を連続的に掃引しつつ測定した。ガラス粉末についての結果の例をFig. 8に示した。周波数の変化に伴って複雑なピークと谷が現われているが、振動により流動化した粒子層の空隙率は大きくなり応力の伝播は小さく、一方、密充てんになる程応力は大きくなる。球体を水平に移動させたときの周波数と力の関係から得られた流動化または充てんの関係は周波数の低い範囲において伝播応力との関係に対応している。しかし100 Hz以上の周波数が高い側では伝播応力は小さめに検出されて流動化が進んでいるようにみえるが、実際には逆に充てんが起っている場合がある。このことは加速度を一定の条件下で周波数を変化させているために振幅が減少しており下部からの振動応力が粒子層によって緩和され伝播応力の絶対値が小さく検出されているものと思われる。したがって球体を粒子層の一定高さのところで水平移動させたときの応力と併せて充てん状態を評価することにより、より現実的な情報が得られるものと思われる。

3.3 混合時間に及ぼす振動の影響

容器を振動させ粉粒体を流動化させつつ羽根により

Fig. 9 Relationship between the mixing time and the frequency

攪拌して均一化する形成の混合機⁹⁾の混合時間 $t_{95}(s)$ に及ぼす周波数 $f(Hz)$ の影響を着色二成分系粉粒体を用いて調べた結果の例をFig. 9に示した。使用した粉粒体はガラス粉末で混合時間は最終混合状態に到達する95%の時間とした。図から振動周波数が33.3 Hzのところに混合時間が最小になる点が存在し、この周波数は先に示した抵抗力-周波数の関係で抵抗力が極小値を示し流動化し易くなっている周波数範囲であることがわかる。したがってこの周波数のところで羽根による攪拌効果が最も良く発揮されている。攪拌回転速度が2500 rpm以上では振動の有無にかかわらず良好な流動状態となり混合時間は約50秒で一定となった。

4. 結 言

振動による粉粒体の流動性の変化を評価する目的で定加速度、定引張り速度で球体を水平移動させたときに球に作用する抵抗力を測定する装置を試作した。この装置によって粉粒体の流動化あるいは充てんに対する周波数の影響が検出できるとともに垂直方向への伝播応力を併せて測定すれば粒子の微妙な物性変化なども感度良く測定できる可能性がある。球体の大きさ、粒子層高、引張り速度、波形など今後さらに検討を要するが、この装置で比較的容易に粉粒体の振動物性が測定でき、一応用例として容器振動式混合機の最適周波数の選定ができた。

References

- 1) Yoshida, T. and Y. Kousaka: *The Society of*

Chemical Engineers, Japan, 32, 82 (1968)

- 2) Yoshida, T., Y. Kousaka and A. Yutani : *ibid.*, **32**, 470 (1968)
- 3) Arakawa, M. and M. Nishino : *J. of the Society of Materials Science, Japan* , **20**, 776 (1971)
- 4) Takeuchi, M., K. Miwada, H. Nagasawa and S. Hayakawa : *ibid.*, **27**, 686 (1978)
- 5) Yoshida, T., Y. Kousaka, I. Aya and Y. Kitamura : *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers*, **34** , 1217 (1968)
- 6) Arakawa, M. and M. Nishino : *J. of the Society of Materials Science, Japan*, **24**, 654 (1975)
- 7) Kohata, T., K. Gotoh and T. Tanaka : *The Society of Chemical Engineers, Japan*, **31**, 55 (1967)
- 8) Satoh, M., Y. Deguchi, S. Komura and K. Miyanami : *J. of the Society of Powder Technology, Japan*, **22**, 79 (1985)