エアーハンマーの衝撃による粉体滑落

秋山 鐵夫*, 河野 元美**

Solid Bed Displacement Induced by Air Hammer Impact

by

Tetsuo AKIYAMA[†] and Motomi KONO^{††}

This paper is concerned with the displacement of powder beds in an inclined vessel. The displacement was induced by an impact stress applied at the bottom of the vessel by an air hammer. The effects of the intensity of the impact stress, the bed height and the angle of vessel inclination on the bed displacement were investigated. The angle of vessel inclination was found to be by far the most dominant factor in determining the extent of powder bed displacement. This suggests that hopper geometry is the key to ensuring the reliable and efficient operation of the solid discharge.

Key Words : Silo, Granular Material, Discharge, Impaction

1. 緒 言

粉粒体を扱うプロセスの構成要素の1つに、粉粒体をホッパーなどの貯槽から連続的あるいは断続的に取り出す操作が含まれる場合がある。製品の均一化を計するためには貯槽から粉粒体を一定の質量速度で排出し、貯槽内に一部の粉粒体が長く滞留することを防がなければならない。生産工場で扱う粉粒体にはいくらかの水分を含み、そのため付着性を持つものが多い。特に微粉ではこの傾向が著しく、以下に記すようなトラブルがおこりやすい¹⁾。

(1) 貯槽下部の出口付近で粉体が壁面に付着し、ブリッジが形成され上部の粉体流出が妨げられる。

(2) 貯槽の比較的上部で粉体の圧縮が起こりアーチが形成され粉体の流出が妨げられる。

(3) 貯槽の中心部の粉体のみ排出され、新しい原料

を投入しても中心部から排出され、貯槽の壁付近の古い粉体はいつまでも残存するいわゆるラットホールが生じる。

(4) 付着性の強い粉体の場合には一般的に天候に左右されやすく、温度・湿度が高いとき一部が貯槽壁面に付着し排出されない。

上記した粉体架橋・付着の対応策として(1)圧縮空気の吸き込み、(2)振動機による振動、(3)ノッカーによる衝撃、(4)旋回スクリーなどによる機械的かき落とし、等の方法がある。粉体層に振動を加えると、条件により粉体層は圧密する場合と膨張する場合がある。粉体層が圧密する場合、貯槽出口の閉塞を促進するので²⁾振動機は一般的に流量調節に使われることが多い^{3,4)}。最近齊藤⁵⁾は、ホッパー排出口に振動する円筒コイルばねを組み込み、粉体を流動化させ流量調節する方法を報告している。ノッカーによる衝撃としてはエアーハンマーが広く用いられている。しかし、アーチ、ブリッジ、ラットホール、付着等に対する衝撃の効果に関してのデータは皆無に等しく、エアーハンマーの設置は全く勘と経験に頼っているのが現状である。衝撃の強さと粉体架橋・付着の力学的強さの関係を定量的に扱うため、一定の強度を持つアーチやブリ

1993年 7月 2日 受付

* 静岡大学工学部化学工学科
(〒432静岡県浜松市城北3-5-1) TEL. 053-471-1171

** (株)アコー(〒272-01 千葉県浦安市北栄2-10-13)

† Dept. of Chem. Eng., Shizuoka Univ.,
(3-5-1 Johoku Hamamatsu, 432)

†† AKo Co., Ltd. (1-1-12 Kitasakae, Urayasu, 279)

ッジを再現性良く作るのは容易なことではない。本研究では容器に加えられる衝撃の強さと粉体層挙動の関係を調べる基礎研究の第一歩として、衝撃による斜面上粉体層滑落の実験を行った。いくつかの知見を得たのでここに報告する。

2. 実験

2.1 実験装置及び方法

粉粒体の容器は厚さ3mmの鉄板を用い、1213×1213×146mmの角型のものを作製し使用した。容器には朱色の防錆塗装を施した。容器中央底面のエアハンマーが衝撃を与える部分に、直径300mm厚さ45mmの補強板を取り付けた。実験装置の概要と容器の平面図をFig. 1に示した。容器底面の圧力変換器取り付け位置をB₁～B₅で示した。B₂～B₃間は150mm, 他はそれぞれ120mm間隔に設定した。実験は次の順序で行った。容器に粉体を一定高さに充填し、設定傾斜角まで傾けて固定する。コンプレッサーを始動させ、圧力調節器で空気圧を設定し、エアハンマーに空気を送入する。エアハンマーを作動させ、衝撃波を記録計に収録する。粉粒体が滑落し、容器底面が露出した距離Yを測定する。本実験範囲内では横方向zによるYの違いはあまり顕著ではなかった。同じ操作を容器の傾斜角度、空気圧、粉粒体の層高を変えて行った。但し衝撃波の収録は容器を水平に設置した場合にのみ行った。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table Physical properties of particles

Property		Glass beads (GB)	Calcium car- bonate(CaCO ₃)
Size range	(μm)	75-124	1-30
Mean diameter	(μm)	99	13.5
Bulk density	(kg/m ³)	1550	1230
Angle of repose	(°)	25	52

2.2 実験条件

試料粉粒体としては、流動性が比較的良好な平均粒径99μmのガラスビーズと、付着性のある炭酸カルシウム微粉を用いた。試料粉粒体の物性はTableに示した。

エアハンマーの空気ゲージ圧

$$P=191.1\sim686.5\text{kPa}$$

粉粒体の層高

$$L=0.01, 0.02, 0.03\text{m}$$

容器傾斜角度

$$\theta=0\sim32^\circ$$

3. 衝撃力を表すパラメーター

エアハンマーに与えられた空気圧を、そのまま粉体を含む容器が受けた衝撃圧とすることは一般的にできないので、容器が受けた衝撃を何らかの方法で定量化する必要がある。本研究においては、容器底面に取り付けた圧力変換器で検知された衝撃波を用い、衝撃の強さを表すパラメーターを定義しその値を求めた。記録された衝撃波の一例をFig. 2に示す。

1回の衝撃で、高い周波数の波(実線)10～80個より構成される低い周波数の波(包絡波線)が、1～4個記録される。衝撃後15秒までの衝撃波をFig. 2に示したが、このように顕著なピークを持つ波は20～40秒以後はほとんど見られない。この図より次の2つのパラメーターIとσ_mを求めた。

3.1 衝撃力 I

衝撃波を増幅・減衰サインカーブの集合体と見なし、衝撃波に包絡曲線(Fig. 2の波線)を引き、衝撃応力と時間の間に次の関係式を仮定した。

$$\begin{aligned}\sigma_1(t) &= \sigma_1 e^{-k_1 t} \sin(\omega_1 t + \delta_1) & 0 \leq t \leq t_1 \\ \sigma(t) &= \sigma_2 e^{-k_2 t} \sin(\omega_2 t + \delta_2) & t_1 \leq t \leq t_2 \\ \sigma_n(t) &= \sigma_n e^{-k_n t} \sin(\omega_n t + \delta_n) & t_{n-1} \leq t \leq t_n\end{aligned}\quad (1)$$

Fig. 2 Time profile of impact stress induced by air hammer

ここで $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ は1つの低い周波数の波の振幅(高い周波数の波の最大値), ω_n は角周波数, δ_n は位相角, k_n は定数であり, これらの値は衝撃波の実測値から最小二乗法で求めた。各測定点における衝撃力 I , 全衝撃力 J をそれぞれ Eqs.(2), (3)より求めた。

$$I = \int_0^{t_1} |\sigma_1(t)| dt + \int_{t_1}^{t_2} |\sigma_2(t)| dt + \int_{t_{n-1}}^{t_n} |\sigma_n(t)| dt \quad (2)$$

$$J = \sum_{i=1}^5 A_i I_i \quad (3)$$

ここで I_i は B_1-B_5 各場所における I で, A_i は各圧力変換器取り付け場所の中間点を境にして容器の底面積を A_1-A_5 の5つの部分に分割した各々の面積である。

3. 2 最大衝撃応力

上記Eqs.(2), (3)より I, J を算出するのは, ピークの数を数える等非常に時間を要するので, 簡便に得られるパラメーターとして, 最大衝撃応力 σ_m と次式で定義された面積平均値 $\bar{\sigma}_m$ を考えた。

$$\bar{\sigma}_m = \frac{\sum_{i=1}^5 A_i \sigma_{mi}}{\sum_{i=1}^5 A_i} \quad (4)$$

ここで σ_{mi} は各測定点における最大応力で, 実質的には各場所で記録された σ_1 である。

4. 実験結果及び考察

層高0.01, 0.02, 0.03mにおける衝撃力 I と容器中心からの距離 z (Fig. 1参照)の関係を, ガラスビーズの場合を例にとりそれぞれFigs. 3と4に示した。層高0.01mのときは $z=0.04$ m近傍で I が大きくなっている。これに対し層高0.03mのときは $z=0.04$ m近傍で I は多少増加の傾向にあるが, 容器中心から離れるにしたがって大体下に凸の曲線を描いて減少していることがわかる。層高0.02mの場合も層高0.03mの場合と同様な傾向を示した。 $z=0.04$ m近傍で I が増加する傾向を示すのは, 容器の固有振動モードが影響しているものと思われる。 I よりはるかに簡単に求められる衝撃力を表すパラメーターとして最大衝撃応力 σ_m がある。 σ_m は実質的には B_1-B_5 点における σ_1 になる。層高0.03mの場合における σ_m と z の関係を示したのがFig. 5である。層高0.01, 0.02mの場合も同様な傾向を示した。 I vs z のグラフに比較して σ_m vs z のグラフでは $z=0.04$ m近傍での σ_m 値の突出がなく, 容器の中心から離れるに従って下に凸の曲線を描いて σ_m 値が減少している。

ガラスビーズの場合について滑落距離 Y と容器傾

Fig. 3 Relation between impulse and distance from the center of vessel base($L=0.01$ m)

Fig. 4 Relation between impulse and distance from the center of vessel base($L=0.03$ m)

斜角 θ の関係を示す一例をFig. 6に示した。層高が0.01から0.02mに増すと Y の値が右側に大きくシフトしているが, 層高0.02と0.03mでは Y の値にあまり大きい違いのないことがわかる。炭酸カルシウムの場合についての一例をFig. 7に示した。Fig. 6と比較する際スケールの違いに注意されたい。層高0.02と0.03mでは Y の値にあまり大きい違いのないことはガラスビーズの場合と同様であるが, 層高0.01mで Y が極端に小さい値をとる。これはガラスビーズの場合と逆である。ガラスビーズの場合は, 衝撃力 P が一定のとき層高が増すと衝撃エネルギーが粉体層ネットワークの変形に使われるため Y が小さくなると考えられる。しかし炭酸カルシウム微粉の場合は, 層高がある程度($L \geq 0.02$

Fig. 5 Relation between maximum impact stress and distance from the center of vessel base

Fig. 6 Relation between particle bed displacement and angle of vessel inclination (GB)

Fig. 7 Relation between particle bed displacement and angle of vessel inclination (CaCO₃)

m)大きくなると衝撃時に表層流れが観察される。したがって容器に接している粉体層も、表層流れにひきづられYが大きくなると推察される。ガラスビーズの場合について、層高0.02と0.03mにおけるYとJの関係の一例を、それぞれ**Figs. 8と9**に示した。いずれのグラフにおいてもYはθの大きさにより決まり、Jの値とはほとんど関係ないことがわかる。平均最大応力 $\bar{\sigma}_m$ とYの関係の一例を**Fig. 10**に示した。J vs Y, の場合

Fig. 8 Relation between particle bed displacement and total impulse (GB L=0.02m)

Fig. 9 Relation between particle bed displacement and total impulse (GB L=0.03m)

Fig. 10 Relation between particle bed displacement and area mean value of maximum impact stress (GB)

と同じくYはθの大きさにより決まり $\bar{\sigma}_m$ の値にはほとんど依存しないことがわかる。

以上の結果は衝撃力を表すパラメーターとして $\bar{\sigma}_m$ よりJを用いる有意性がないことを示唆している。炭酸カルシウム微粉の層高0.02と0.03mにおける $\bar{\sigma}_m$ とYの関係の一例を**Figs. 11と12**に示した。層高0.02mの時θの増加に伴いYが増加するのは前図(Fig. 10)と同じであるが、異なるのはYの絶対値が小さいことと(スケールの違いに注意)θ>23°においてYが $\bar{\sigma}_m$ の増加に伴い増加することである。層高0.03mの場合(Fig. 12)は0.02mの時と比較してYに対する $\bar{\sigma}_m$ の影響は小

Fig. 11 Relation between particle bed displacement and area mean value of maximum impact stress(CaCO₃ L=0.02m)

Fig. 12 Relation between particle bed displacement and area mean value of maximum impact stress(CaCO₃ L=0.03m)

さく、また同じ $\bar{\sigma}_m$ に対する Y は一般的に大きい。なぜこのような現象が起こるかは今後の検討課題としたい。

5. 結 論

エアーハンマーの衝撃による斜面上粉体層滑落の実験を行い以下の知見を得た。

(1)エアーハンマーの衝撃圧、容器傾斜角 θ 、共に一定の時、粉体滑落距離 Y は層高0.01mと0.02mの場合では大きく異なるが層高0.02mと0.03mではその差が非常に小さい。

(2)衝撃圧一定で傾斜角 θ がある値以上の時、ガラスビーズの場合 Y は粉体層の高さが増すと小さくなるが、炭酸カルシウム微粉の場合はその逆の結果が(層高0.01mと0.02mで)観測された。

(3)滑落距離 Y は容器傾斜角 θ の大きさにより大きく変わる。ガラスビーズの場合、 Y は θ 一定の時全衝撃力 J 、平均最大応力 $\bar{\sigma}_m$ の値にはほとんど影響されない。これに対し炭酸カルシウム微粉の場合、 Y は θ が一定値を越えると、 $\bar{\sigma}_m$ の増加に伴い増加する。

(4)衝撃による斜面上粉体層滑落のデータをエアーハンマー設置基準作製に役立てるには、今後更に多くの実験を必要とするが本研究結果より次のことが推測される。粉体架橋・付着の対応に際しては、エアーハンマーの衝撃力の大きさより貯槽形状の方が設計上重要であり、貯槽下部の傾斜角が水平に近付くほど大きい衝撃力を必要とする。

[謝 辞] 本研究において実験の実施及びデータ整理の協力を得た学生、伊藤典明、祖父江進史、滝塚誠、西羅正規、吉村滋明君に感謝します。

Nomenclature

A_n	: local area associated with stress sensor	(m ²)	z	: coordinate (Fig. 1)	(m)
d_s	: particle diameter	(μ m)	δ_n	: phase angle in Eq.(1)	($^\circ$)
$\bar{d}_s$	: mean particle diameter	(μ m)	θ	: angle of vessel inclination	($^\circ$)
I	: local impulse	(Pa)	ρ	: bulk density of particles	(kg·m ⁻³)
J	: total impulse	(Pa)	σ_m	: maximum peak stress	(Pa)
k_n	: constant in Eq.(1)		$\bar{\sigma}_m$	: area average of maximum peak stress	(Pa)
L	: bed height	(m)	σ	: peak value of $\sigma(t)$	(Pa)
P	: air pressure for air hammer	(m)	$\sigma(t)$	: impact stress	(Pa)
t	: time	(s)	ω	: angular frequency	(s ⁻¹)
Y	: particle bed displacement	(m)			

References

- 1) Kano, T: "Funtai-yusougijutsu" p. 346, Nikkankogyo, Tokyo(1991)
- 2) Jenike, A. W.: *Bulletin of Univ. Utah.*, **49**, No. 96(1958)
- 3) Tanaka, T: "Funtai-process-nyumon" p. 76, Kogakutosho Co., Ltd. Tokyo(1981)
- 4) Nihon Funtai Gijutu Kyosai (ed.): "Funryutai no Baruku Handringu Gijyutsu", p. 226, Nikkan-kogyo, Tokyo(1985)
- 5) Saito, M: *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **29**, 248 (1992)