粉体層の圧縮粉碎

神田 良照*, 高橋 俊介*
畑 勇治*, 本間 寅二郎*

The Compressive Crushing of Powder Bed

by

Yoshiteru KANDA[†], Shunsuke TAKAHASHI[†],
Yuji HATA[†] and Torajiro HONMA[†]

Roller mills have come to be actively used for the fine grinding of solids. In this paper, the compressive crushing of powder beds was carried out to study a roller mill. The effect of the applied load, the mass of feed and the particle size on the probability of crushing and on the crushing resistance were studied. The sample used was quartz. The following results were obtained :

- 1) When the applied load was constant, the deformation of the powder bed increased with the increase in the mass of feed and particle size.
- 2) The probability of crushing increased with the increase in the applied load, but the rate of increase of the probability gradually decreased.
- 3) The mass of the feed with a low crushing resistance was observed, and it had a certain range. This range narrowed with the decrease in the particle size.
- 4) The crushing resistance increased with the decrease in the particle size.

Key Words: Powder Bed, Compressive Crushing, Probability, Crushing Resistance

1. 緒 言

現在、我が国では、多量の粉粒体が処理されており、それらの多くは、破碎・粉碎され大量のエネルギーを消費している。その省エネルギー化を目的とした研究・開発がなされており、その一つに粉碎機の見直しがある。

従来、セメント工業や石炭の微粉碎においては、ボールミルが用いられてきたが、近時ローラーミルが盛んに用いられるようになってきた。このローラーミルは、粉碎エネルギーがボールミルと比べ20~30%の省エネルギーが可能であると言われている。また粉碎・

乾燥・分級の操作を同一装置で行うことができ、かつ床面積が小さく騒音も少ないという利点も兼ね備えている。ローラーミルの粉碎機構は、ローラーの回転運動に伴う遠心力、または垂直荷重により、ミル壁あるいは円盤上の碎料を圧縮せん断しながら粉碎を行うものであり、粉体層の圧縮荷重による粉碎が基本となっている¹⁾。

この粉体層の圧縮粉碎に関しては、これまで松居²⁾により粉碎正味仕事量と比表面積増加量を荷重条件と碎料物性から推算する方法が、またHanish³⁾によりプランジャーの形(Stress geometry)の荷重-変位曲線への影響、単一粒子破碎との比較、粉碎産物の粒子径分布について実験、検討が行われているが、いまだ十分とはいえない。

そこで本研究では、ローラーミルの基礎的実験として、粉体層の圧縮粉碎を試料の充てん質量および粒子径、加える荷重を変えて行い、粉碎確率やエネルギー効率の点から検討を行った。以下にその結果を報告す

昭和62年11月16日受付

粉体工学会昭和62年度秋期研究発表会にて発表(1987年10月、東京)

* 山形大学工学部化学工学科(〒992 米沢市城南4-3-16)

TEL 0238-22-5181 内線 285

[†] Dept. of Chem. Eng., Yamagata University, Yonezawa 992

る。

2. 試料と実験方法

2.1 実験装置

実験に用いた装置の概略図をFig. 1に示した。①はロードセル、②は差動トランス、③および④は粉碎装置で、それぞれ臼および杵であり、いずれも窒化ケイ素製である。また⑤はx-yレコーダーである。

Fig. 2には、粉碎装置の詳細図を示した。

2.2 試料

実験に用いた試料は石英で、その物性値をTable 1に示した⁴⁻⁶⁾。ジョークラッシャーと人手により粗砕・粉碎の後、2^{1/4}系列のふるいを用いてロータップ振とう機により、3.5～4(5.660～4.760 mm)、7～8

(2.830～2.380 mm)、12～14(1.410～1.190 mm)、24～28(0.710～0.590 mm)、48～60(0.297～0.250 mm)、80～100 mesh(0.177～0.149 mm)の6種類の粒度区間に整粒した。ふるい分け条件は、一度おおよその粒度区間にふるい分けした後、各ふるいに100g程度入れてロータップふるい振とう機で10分間再度ふるい、整粒した。

2.3 実験方法

粉碎実験は、臼内に平らに充てんした試料に対して、昭和測機製のペレット試験機を用い、杵を介して圧縮荷重を加え行った。荷重条件は、装置の都合上変位速度を一定とし、用いた変位速度は、いずれの実験においてもメーカー表示の0.5 mm/minである。加えた圧縮荷重は最小が10³ N、最大が10⁴ Nであるが、充てんする試料の粒子径、質量の兼ね合いから10³ N間隔の10種類と2×10³ N間隔の5種類の2通りとした。また、試料の充てん質量は9gの整数倍で9～72gの8種類である。なお基準となった試料充てん質量9gは以下のようにして決定した。すなわち、本実験で用いた最大粒度区間である3.5～4 meshの粒子を実際に臼内に目測で一層となるように充てんし、その質量を測定したところ約9gであった。またこれは、試料の整粒に用いたふるい目開きの算術平均径を直径とする球を仮定し、これの一層の投影面積が臼の底面積の50%をしめるとして計算した質量と一致した。それで9gを基準として充てん質量を決定した。

また、3.5～28 meshにおける4つの粒度区間についても、同様にして計算した一層となる試料質量の粉碎実験を行った。

粉碎産物は充てんした試料の整粒に用いた目開きの小さいふるいを通過した粒子と定義し、粉碎実験後、手ふるいにより分級し質量を求めた。粉碎に要したエネルギーE[J]は、x-yレコーダーで記録された荷重-変位曲線を図積分して求められるエネルギーと定義した⁷⁾。また、粉碎確率P_f(-)をEq.(1)で定義した。

$$P_f = \frac{m}{M \times 0.64} \tag{1}$$

ただし、M[kg]は試料充てん質量、m[kg]は粉碎

- ① Load cell
- ② Differential transformer
- ③ Grinding vessel
- ④ Plunger
- ⑤ x-y recorder

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Crushing apparatus

Table 1 Properties of quartz

ρ [kg/m ³]	Y [Pa]	ν [-]	W_i [kWh/t]	H.G.I [-]	H_s [Kg/mm ²]	H_m [-]	S_s [Pa]
2.62×10^3	8.71×10^{10}	0.16	13.3	37	245	6.5	1.1×10^7

産物質量で、定数 0.64 は杵底面積を臼内底面積で除した値である。

また、ここでは E/m [J/kg] を粉碎抵抗と定義し、粉碎性の評価として用いた。

3. 結果と考察

3.1 荷重-変位曲線

測定した荷重-変位曲線の代表例を **Fig. 3** および **4** に示した。

Fig. 3 は粒度区間 12~14 mesh について、充てん質量を変えた場合の結果である。参考のために図中には、12~14 mesh の目開きの算術平均粒子径 1.3 mm を直径とする球を平行平板で圧縮した場合の荷重-変位曲線を弾性理論から計算して示した^{8,9)}。**Fig. 3** は試料に加えた加重が一定の場合、充てん質量が多いほど変位が大きくなり、多くのエネルギーが消費されていることを示している。また、**Fig. 4** は試料充てん質量を 18 g の一定として、平均粒子径 $\bar{x}$ (試料の整粒に用いた二つのふるい目開きの算術平均径) を変えた場合の荷重-変位曲線である。充てんする試料の粒子径が大きいほど、同一荷重に対して変位が大きく、多くのエネルギーが消費されている。また、粒子径が大きくなると部分破壊の影響が大きく現われ、荷重-変位曲線の形が複雑になっている。

Fig. 3 Load-deformation curve

Fig. 4 Load-deformation curve

3.2 試料充てん質量の粉碎確率と粉碎抵抗への影響

Fig. 5 に供給粒度を 12~14 mesh の一定とし、充てん質量 M [g] をパラメータとして、粉碎エネルギー E と粉碎確率 P_f の関係を示した。当然のことながらどの充てん質量においても加えるエネルギーの増加とともに粉碎確率が大きくなり粉碎の進行が見られる。しかしエネルギーの増加に伴って粉碎確率の増加割合は減少し、エネルギー効率を加えるエネルギーの増加とともに悪くなっていくことが認められる¹⁰⁾。また **Fig. 5** から明らかなように、同じ粉碎確率を得るためのエネルギーは、充てん質量の増加とともに増加する。しかしそのとき得られる粉碎産物も多くなる。つまり、粉碎産物の単位質量当りのエネルギー消費を考える必要がある。そこで粉碎効率に与える試料充てん質量の影響を見るために、**Fig. 6** に単位質量の粉碎産物を得るのに要するエネルギー、つまり粉碎抵抗 E/m と、充てん質量 M の関係を粉碎確率をパラメータとして示した。なお、任意の粉碎確率を得るための粉碎エネルギーは、**Fig. 5** のグラフ上より求めた。**Fig. 6** からいづれの粉碎確率においても粉碎抵抗が比較的低くなる質量範囲が見られ、試料充てん質量に最適範囲が存在することがわかる。また、この図から粉碎確率を大き

Fig. 5 Variation of probability of crushing with input energy

Fig. 6 Effect of mass of feed on crushing resistance

くすると粉碎抵抗も大きくなり、エネルギー効率が悪くなることが確認できる。つまり粉碎確率の低い粉碎初期に分級操作を行い、粉碎・分級を繰り返し操作することが必要であることがわかる。

3.3 充てん試料粒子径の粉碎抵抗への影響

これまでは充てん粒度が12～14 meshの試料について検討したが、つぎに充てん粒度を変えて同様な検討を行った。

その結果をFig. 7 (a)～(c)に充てん粒度24～28, 48～60, 80～100 meshについてそれぞれ示した。Fig. 7には示さなかった3.5～4 meshの粒度を除いて他の粒度では、Fig. 6の12～14 meshの場合と同様に充てん質量の最適範囲が存在することが認められる。ここで3.5～4 meshの粒度で充てん質量の最適範囲が見られない理由としては、充てんした試料の粒子径が粉

Fig. 7 Effect of mass of feed on crushing resistance

碎装置寸法に対して大きすぎたためや、実際に杵によって荷重の加えられる個数が充てん質量が9 gで約31個にしかすぎず、粉体層として取り扱うには少なすぎる個数であったためと考えられる。

以上の理由により以後は、3.5～4 meshの粒度は除いて検討した。また、最適な試料充てん質量が存在する理由として、現在のところ以下のように考えている。一般に破壊は固体内の弱い所が選択されて進行するが¹¹⁾、これを粉体層を形成している粒子群について考えてみると、粉体層が薄い場合は加えた荷重によって粉体層中の粒子の移動が起こりにくく(特に単一層の場合)、強度の弱い部分の選択性が低くなり粉碎効率が悪くなるものと考えられる。一方粉体層が厚くなりすぎると、逆に粒子の移動、すなわち粉体層の変形にエネルギーが消費され、加えたエネルギーが有効に粒子の破壊には使われず効率が低下するものと考えられる。以上のことから、本実験で得られた最適充てん質量では、荷重を受けながら粒子の移動が適当に起こり、この間に粒子の弱い部分が選択的に破壊を起こし、その結果エネルギー効率が良くなるものと考えられる。

つぎに最適充てん質量範囲の粒子径による変化を見るために、Fig. 8に全充てん粒度に共通している粉碎確率0.2の場合について、粉碎抵抗と充てん質量の関係を充てん粒度(粒子径)をパラメータとして示した。Fig. 8から充てん粒子径が大きい場合は、最適充てん質量範囲が広くなり充てん質量の粉碎抵抗への影響は少なくなる。しかし粒子径が小さい場合は、最適範囲が狭くなり充てん質量の少しの差が大きく粉碎抵抗に影響を与えることになる。

Fig. 8より、全実験を通して粉碎抵抗が小さくなる試料充てん質量は、18 gであるので、Fig. 9に粉碎確率0.2について充てん試料の平均粒子径を直径とした球の体積と粉碎抵抗の関係を示した。粒子体積の減少とともに粉碎抵抗が増大することが認められた。

Fig. 9 Relationship between crushing resistance and volume of particle

4. 結 言

ローラーミルの基礎的研究として、石英試料を用いて、充てんする試料の質量および粒子径、粉体層に加える圧縮荷重を変えて粉砕実験を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) 荷重-変位曲線については、粉体層に加える荷重が一定の場合、試料充てん質量が多く、粒子径が大きいほど、変位量が大きくなる。
- (2) 粉砕確率は粉砕エネルギーの増加とともに大きくなるが、その増加割合は加えるエネルギーの増加とともに減少する。
- (3) 粉砕抵抗が比較的小さくなる試料充てん質量の範囲が存在する。
- (4) この充てん質量範囲は、充てんする粒子径が大きい場合は広く、粒子径が小さくなると狭くなる。
- (5) 充てん質量および粉砕確率を一定とした場合、

粒子体積の減少とともに粉砕抵抗が大きくなる。以上のことは、微粉砕になるほど砕料供給質量のコントロールが、より重要な因子になることを示すものである。

Nomenclature

E : energy	[J]	S_s : compressive strength of sphere which has a diameter of 2cm	[Pa]
E/m : crushing resistance	[J/kg]	W_i : Work index	[kWh/t]
$H.G.I.$: Hardgrove grindability index	[-]	$\bar{x}$: mean particle size	[mm]
H_m : Mohs hardness	[-]	Y : Young's modulus	[Pa]
H_v : Vickers hardness	[Kg/mm ²]	δ : deformation	[mm]
M : mass of feed	[g],[kg]	ν : Poisson's ratio	[-]
m : mass of product	[g],[kg]	ρ : density	[kg/m ³]
P : load	[N]		
P_f : probability of crushing	[-]		

References

- 1) Kagaku Kogaku Kyokai : "Funryutai Kogaku", p 36, Maki Shoten (1985)
- 2) Matsui, K., T. Sekiguchi and H. Ikahata : *Kagaku Kogaku*, **35**, 788 (1971)
- 3) Hanish, J. and H. Schubert : 15th. Int. Conf of Mineral Processing, Cannes, Tome 1, 201 (1985-6)
- 4) Yashima, S., S. Morohashi, O. Awano and Y. Kanda : *Kagaku Kogaku*, **34**, 210 (1970)
- 5) Kanda, Y. and M. Suzuki : *J. Res. Assoc. Powder Technol., Japan*, **13**, 487 (1976)
- 6) Honma, T., M. Hasegawa and Y. Asaba : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **6**, 527 (1980)
- 7) Kanda, Y., S. Sano, H. Saito and S. Yashima : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **10**, 108 (1984)
- 8) Timoshenko, S. and J. N. Goodier : "Theory of Elasticity (2nd Ed.)", p. 372, McGraw-Hill (1951)
- 9) Kanda, Y., T. Honma and S. Yashima : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **22**, 390 (1985)
- 10) Tanaka, T. : *Kagaku Kogaku*, **18**, 160 (1954)
- 11) Griffith, A. A. : Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech. (Delft), 155 (1924)