

氏名	齋藤文良
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和57年3月10日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和47年3月 山形大学大学院工学研究科 化学工学専攻修士課程修了
学位論文題目	ぜい性砕料の破碎に関する基礎的研究
論文審査委員	東北大学教授 八嶋 三郎 東北大学教授 下飯坂潤三 東北大学教授 小林 良二 東北大学教授 大谷 茂盛 東北大学教授 阿部 博之

## 論文内容要旨

### 博士論文内容要旨

粉碎という操作は通常は集合粉碎で行われるが、これを個々の粒子の破碎現象の集積した結果であると考えられる。もちろん、粉碎機内ではどの粒子も必ず選択され、同じように破碎されるとは限らず、しかも、このプロセスは時間とともに進行するから、正確には確率過程的現象として取り扱うのが正しい。しかし、粉碎を基礎的に調べるには個々の粒子の粉碎の原点に逆のぼって検討する必要にせまられる。このような観点から出発したのが単粒子破碎の研究であるが、この研究の中でも単粒子に作用する力の作用速度が非常にゆっくりした場合から、瞬間的、衝撃的な場合までの広範囲な荷重速度下での単粒子破碎現象の系統的研究はまだ充分に行われてはいない現状にあって、これは重要な研究課題であると考えられる。それは、たとえばボールミルを例に挙げれば、ボールのもつ落下運動エネルギーの大きさは大きいものから小さいものまで幅広く分布し、それに伴い、砕料がボールの落下運動エネルギーによって受ける力の作用速度も緩慢な場合から、瞬間的、衝撃的な場合まで広範囲にわたると考えられるからである。

本研究は、このような粉碎機内での複雑な破碎現象を基礎的に調べる目的で実施したものであり、広範囲な荷重速度下での単粒子破碎試験から、単粒子の破碎挙動、破碎性に及ぼす荷重速度あるいは荷重状態の影響を定量的には握しようとしたものである。本論文は第6章より構成されており、

各章の内容を要約するとつぎのようである。

## 第1章 緒 論

第1章では集合粉碎現象を基礎的に調べるための本研究の意義とその必要性を述べ、これを実施するための研究方針と研究内容の概要を示した。

## 第2章 荷重速度によるぜい性碎料の材料力学的性質の変化

第2章は、以降の章における単粒子粉碎の実験を理論的に検討するために必要不可欠であるぜい性碎料の材料力学的性質に及ぼす荷重速度の影響を定量的に表示するために実施した研究結果である。ここでは、まず、本研究で使用する代表的な数種類のぜい性碎料として、ガラス質試料3種類、天然産岩石試料6種類を選択し、これらの試料の物理的諸性質ならびに化学成分を明らかにした。ついで、これらのぜい性碎料の破砕に関与する材料力学的性質である圧縮強度、ヤング率、ポアソン比の荷重速度依存性を調べるために、公称直径2 cm、長さ4 cmの円柱形試験片を多数準備し、試験片の相対する両側面にワイヤストレンゲージをはりつけ、材料試験機ならびに高速荷重試験機により広範囲な荷重速度下で圧縮破砕試験を行った。その結果、本実験の範囲内（荷重速度  $\dot{v} = 1.67 \times 10^{-1} \sim 6.07 \times 10^6$  Kg/sec）では荷重速度の増大に伴い圧縮強度、ヤング率は増大し、逆にポアソン比は減少する傾向にあり、これらの材料力学的性質は荷重速度の関数として定量的に表示されることを示した。

## 第3章 常速荷重下における単粒子破砕

第3章は、広範囲な荷重速度下での単粒子破砕試験の中で最も基準となる常速荷重下での単粒子破砕に関して検討を行った結果を述べたものである。実際の粉碎機内での碎料の形状は不規則であるが、本研究では碎料の形状を理想的に球形と考え、本章および以降の章における破砕実験には公称直径2 cmの一定寸法の球形試験片を用いることとした。ここでは、まず、数種類のぜい性碎料の球形試験片を多数準備し、材料試験機による常速荷重下での破砕試験を行い、単粒子の破砕挙動、破砕性の観察を行った。その結果、球圧壊強度（引張強度）は30～40%の変動係数を有するが、その平均値はモース硬度と比例し、また、球圧壊強度は第2章でえた常速荷重下での圧縮強度と比較すると著しく小さい値となり、ぜい性碎料特有の圧縮には強いが引張りには弱い性質を有していることを明示した。つぎに、モース硬度6以上の硬い試料の場合の破砕エネルギーは球圧壊強度の $\frac{5}{3}$ 乗に比例し、理論的關係と近似的に一致するが、モース硬度4以下の軟かい試料の場合には、破砕エネルギーは球圧壊強度の $\frac{5}{3}$ 乗に比例するものの、理論的關係との一致は認められず、両者の不一致のおもな原因について検討したところ、試験片圧縮破砕過程における塑性変形に起因していることを示した。さらに、単粒子の圧縮破砕の状況を観察したところ、おおまかにみて(1)載荷点を結ぶ直径を軸とするコアの部分は細かく破砕し、その周辺部分は三日月形の破砕片となるガラス質試料のグループと(2)3～4個の大きな破砕片と少数の小さな破砕片が生ずる石英、長石のグループおよび(3)載荷点を結ぶ直径を含む大円面で真二つに破砕する石灰石以下の軟かい試料のグループ

との3つのグループに分けられることを示した。また、破碎産物の粒度分布はGaudin-Meloy-Harris (G-M-H) 粒度分布式で良好に表示されることを示した。破碎表面エネルギーはその値のオーダーが  $10^4 \sim 10^5 \text{ erg/cm}^2$  となり、理論的固体の表面エネルギーより大となることを示した。

#### 第4章 低速、準高速ならびに高速荷重下における単粒子破碎

第4章は、第3章における実験結果をも含め、低速から高速までの広範囲な荷重速度下での単粒子破碎実験を行い、これより、単粒子破碎に及ぼす荷重速度の影響を実験的に調べるとともに、破碎効率の改善に対する基礎的資料を得ることを目的として行ったものである。まず、数種類のぜい性砕料の球形試験片を多数準備し、これを材料試験機ならびに高速荷重試験機により広範囲な荷重速度下で圧縮破碎試験を行った。その結果、本実験の範囲内（荷重速度  $\dot{v} = 1.67 \times 10^{-2} \sim 8.33 \times 10^5 \text{ Kg/sec}$ ）では、荷重速度の増大に伴い球圧壊強度は増大し、球圧壊強度は荷重速度の関数として定量的に表示されることを示した。また、荷重速度の増大に伴い破碎エネルギーはガラス質試料では減少し、逆に天然産試料では増大する傾向にあり、どの試料の場合も破碎エネルギーは荷重速度の関数としてあらわされることを示した。さらに、破碎産物の粒度分布はG-M-H 粒度分布式で表示されるが、分布式は荷重速度の増大とともに細粒側へ移行し、破砕片は細くなることを明示した。また、この荷重速度による粒度分布の変化を支配する因子はG-M-H 粒度分布式の粒度比であることを明確にした。破碎産物の粒度分布より求められる増加比表面積は荷重速度の増大とともに増加し、特に常速荷重から高速荷重の範囲で著しく増大することを示した。したがって、破碎表面エネルギーは荷重速度の増大とともに減少する傾向を示し、特に常速荷重から準高速荷重を経て高速荷重に至る範囲で急激に低下し、高速荷重下では破碎表面エネルギーの値のオーダーはどの試料の場合もおおよそ  $10^4 \text{ erg/cm}^2$  となることを示した。ここで、最も基準となる常速荷重下での破碎効率を基にした場合の高速荷重下でのその改善率は約20～950%となり、高速荷重下では破碎効率が著しく改善されることを知った。

#### 第5章 衝撃荷重下における単粒子破碎

第2章から第4章までの研究は、いわゆる衝撃波を取り除き、たとえ高速荷重下であっても試験片と試験機との間には常に内力と外力とが釣り合う、静力学的荷重条件が成立する状態での圧縮破碎試験であった。しかし、実際の粉碎機内では圧縮力と同時に衝撃波が作用する場合もあることから、衝撃荷重下での単粒子破碎の研究も必要であると考えた。そこで、まず、数種類のぜい性砕料の球形試験片を多数準備し、二重振り子型衝撃試験機による単粒子衝撃破碎試験を実施した。まず2つの振り子間で衝撃破碎される球形単粒子の破碎エネルギーおよび力積を求める式を2つの振り子の運動から導出し、この式を用いて振り子の衝突エネルギーによる破碎エネルギーの変化および力積と破碎エネルギーとの関係をそれぞれ求めた。一方、弾性体の衝突の理論を本実験に適用し、衝突エネルギーと弾性ひずみエネルギーとの理論的關係および力積と破碎エネルギーとの理論的關係を導いた。これより、衝突エネルギーと破碎エネルギーとの実測の關係は試験片破壊の起こらない条件で導かれた衝突エネルギーと弾性ひずみエネルギーとの理論的關係と同様の傾向となること

を示した。また、力積と破碎エネルギーとの実測の関係は理論的關係と同様の傾向となり、特に天然産岩石試料の場合、両者は近似的に一致することを示した。これより、本実験における衝撃荷重下の場合でも、静力学的荷重と変位あるいは荷重と時間との関係が近似的に成立するものと推察された。ついで、破碎産物の粒度分布は G-M-H 粒度分布式であらわされることを示し、粒度分布曲線の衝突エネルギー増大に伴う細粒側への移行現象を、分布式を構成する3つのパラメータの衝突エネルギーによる変化として表示した。その結果、粉碎が進行し、粒度分布が細粒側へ移行するのは粒度比が衝突エネルギーの増大とともに急激に増加するためであることを示した。さらに、破碎産物の増加比表面積と破碎エネルギーとの関係から、二重振り子型衝撃試験機による単粒子破碎におけるエネルギー法則は、Rittinger 則よりはむしろ田中の粉碎限界説と類似の關係となることを示した。また、破碎効率に関して、第3章でえた常速荷重下での値と衝撃荷重下での値とを比較すると、両方の荷重下での値が同程度となる試料と衝撃荷重下のほうが良好となる試料との2つのグループに分けられることを示した。

## 第6章 結 論

第6章では以上述べた各章の内容を要約して結論とした。

## 審査結果の要旨

粉碎は現在、鉱業、化学工業、窯業などの各種工業において広く用いられている単位操作であるが、その設計と操作に関してはいまだに未解明な問題を数多くかかえており、経験に頼ることが多いのが現状である。

本研究は粉碎操作において最も難点とされている粉碎機内での破碎現象の解明と粉碎工程の合理的設計のための基礎的資料を得ることを目的として、各種ぜい性碎料の破碎現象に及ぼす荷重速度と荷重状態の影響を究明した成果をまとめたものであり、全編6章より成る。

第1章は緒論であり、既往の研究を概観すると共に本研究の必要性と目的を述べている。

第2章では広範囲に荷重速度を変化させて各種ぜい性碎料の材料力学的性質が荷重速度により変化する状況を述べている。荷重速度の増大に伴い、強度、ヤング率は増大し、逆にポアソン比は減少するが、これらの関係を定量的に表示することは、以降の章において碎料の破碎エネルギーを理論的に求めるのに必要であると述べている。

第3章は最も基準となる常速荷重下での単粒子破碎について述べたものである。まず実測の単粒子の破碎エネルギーと強度との関係は塑性変形を伴わない場合はもとより、塑性変形を伴う場合でもこれを考慮することにより、理論的關係ときわめて良く一致することを示している。ついでぜい性碎料の破碎状況と破碎性の相違は碎料の物理的性質と力学的性質から説明できることを述べている。

第4章では単粒子の破碎挙動と破碎性に及ぼす荷重速度の影響について述べている。荷重速度を広い範囲に変化させて単粒子の破碎を行うと、実測の破碎エネルギーと荷重速度との関係は第2章の結果を用いて得られる理論的關係と良好に一致することを示している。また破碎表面エネルギーは荷重速度の増大に伴い減少し、物理的に測定されている固体の表面エネルギーに近づくことを実験的に明示している。この結果は粉碎効率が荷重速度の増大に伴い著しく改善されることを示すもので、著者が明らかにした重要な成果の一つである。

第5章は衝撃荷重下での単粒子破碎に関して述べている。衝撃荷重下での破碎エネルギーの実測値は弾性体の衝突の理論に破碎現象を考慮して求めた理論値と良好に一致し、破碎エネルギーは衝撃速度の増大とともに増加することを示している。しかし前章に述べた高速荷重下までの破碎現象と衝撃荷重下でのそれとはまったく異なり、衝撃速度を大としても破碎表面エネルギーの低下は望めず、粉碎効率は必ずしも改善されないことを実験的に確かめている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文はぜい性碎料の破碎現象に及ぼす荷重速度と荷重状態の影響を基礎的破碎実験から究明したもので、従来経験に頼っていた粉碎工程の設計および操作上重要な知見を提供しており、鉱物処理工学ならびに粉体工学とその工業に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。