

論 文

622.341.1:539.562:539.383:539.215.2 鉄鉱石の破碎における破碎荷重速度と破碎産物の粒度分布*

向井 滋**・一伊達 稔***・柳生 和威****

Relation between the Size Distribution of Crushed Product and the Rate of Loading for Iron Ore Crushing

Shigeru MUKAI, Minoru ICHIDATE and Kazutake YAGYU

Synopsis:

The relation between the size distribution of crushed product and the rate of loading for iron ore crushing was studied.

From the crushing tests in which the compression length and the compressing time for each compression length were kept constant, it was confirmed that the amounts of fine particles of the crushed product increased remarkably with the increase of the rate of loading.

The breaking strength and the apparent YOUNG's modulus of the glass and the iron ores were measured. The breaking strength and the apparent YOUNG's modulus of the glass and the iron ores markedly increased as the rate of loading increased. The relationship between the rate of loading and the breaking strength was proposed by the PLANDTL's equation.

It was considered that the changes in the dynamical behaviors of the ores with the variation of the rate of loading closely relate to the production of fine particles of the crushed product.

Thus, the rate of loading is one of the most important factors which have a great influence on the size distribution of the crushed product of iron ores.

(Received Aug. 10, 1968)

1. 緒 言

著者らはこれまでに、鉄鉱石の破碎について、特定の粒径範囲内の破片をできるだけ多量に獲得し、不必要な微粉の生成を防止する整粒粉碎法として、開回路および閉回路破碎過程のいずれにおいても、多段粉碎がきわめて有効であることを確かめた。

すでに前報¹⁾において詳細に述べたように、破碎産物の粒度分布は破碎比と密接な関係をもち、破碎比を大にとることにより、破碎産物の微粉の生成量は顕著に増大する。破碎比を大にとることは、圧縮距離の増大をもたらすとともに荷重速度の増大をきたす。圧縮距離が増大すれば、一度破碎を受けた破片がさらに引き続いて破碎される現象を伴い、その結果として過粉碎がひき起こされる。このような再破碎によつてどの程度の過粉碎がひき起こされるかについては、一度破碎された破片が受ける再破碎の回数、再破碎を受ける鉱石の量的な割合によつて決まるものであり、実験や計算が必要であるが、圧縮距離の増大による過粉碎の現象は当然の結果であ

り、破碎の本質的な究明という見地からはむしろ離れた問題であるように考えられる。そこで著者らは破碎産物の粒度分布を支配する基本的な因子の1つとして荷重速度を取り上げ、破碎荷重速度が破碎産物の粒度分布に与える影響を与えるかを検討することを試みた。

荷重速度と岩石の力学的特性との関係を求めた従来の研究として R. J. CHARLES²⁾、中川、松居³⁾、堀部、小林⁴⁾、下村、高多⁵⁾らの研究がある。いずれの研究も主として荷重は落錐によつて与えられ、落錐の落下距離を変えることによつて岩石に与える衝撃速度を変えている。この種の研究では、荷重が与えられた瞬間の速度は種々変えることができるが、物体が荷重を受け破壊に達するまでの荷重速度をある一定の値に正確に保持することは困難であり、厳密な意味の荷重速度を示すものとはいいがたい。しかも、著者らの研究の対象は圧縮破壊で

* 昭和43年8月10日受付

** 京都大学工学部 工博

*** 京都大学工学部

**** 京都大学大学院

あり、この種の研究の対象は衝撃破壊である。

下村、高多らは $10^{-1} \text{ kg/cm}^2 \text{ sec} \sim 10^3 \text{ kg/cm}^2 \text{ sec}$ の荷重速度範囲で測定を行なっている。低荷重速度の範囲では油圧式万能試験機を使用していて、荷重速度の調節は手動によつてなされている。したがつて、岩石に与えられる荷重速度が破壊に達するまで完全に一定速度に保持されたか否かについては疑点がある。著者らはこの意味で荷重速度を可能な限り一定に保持するオートグラフ試験機を測定に使用した。

しかも上記の研究はいずれも岩石力学に関する研究であり、衝撃速度あるいは荷重速度と岩石の破壊強度との関係を実験的に求めたものであり、中川、松居は衝撃破壊における物体の受ける正味仕事を求めたものであり、破壊荷重速度と破碎産物の粒度分布との関係を求めた研究はこれまでは全く見当たらない。そこで著者らは、鉄鉱石の圧縮破碎において、鉱石が荷重を受け破壊に達するまで厳密に荷重速度を一定に維持して実験を行ない破壊荷重速度と破碎産物の粒度分布との関係を究明することを試みた。

2. 破碎荷重速度と破碎産物の粒度分布

2.1 実験の試料

実験の試料には、組織的に均一であり脆性材料と考えられる硬質ガラスおよびインド鉄鉱石、オーストラリア産ゴールドワージー鉄鉱石を使用した。試験片は、鉄鉱石については、できるだけ割目や空孔のない塊鉱から $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ の角柱を載荷方向に層理が直角になるように、ダイヤモンドカッターで切り出した。硬質ガラスについては、直径 10 mm のガラス棒を高さ 20 mm に切り取った。鉄鉱石の角柱および硬質ガラスの円柱試験片については、上下の圧縮面の隅の部分に応力集中がおこり、破碎に変化の生ずるおそれを避けるために上下の圧縮端面の隅をごくわずかに研磨して実験に供した。これらの試験片は、すべて載荷上下面を可能な限り平行にかつなめらかに研磨成型した。

さらにガラス試験片については、載荷上下面の小さな凹凸や内部応力などを除去する目的で、電気炉で加熱し、その後徐冷する熱処理を、Fig. 1 に示すようなスケジュールで行なつた。

2.2 破碎試験

試験装置には、オートグラフ材料試験機 IS-5000 型（島津製作所製）を使用し、C.T. 式圧縮荷重装置を取り付けた。この装置の負荷方式を Fig. 2 に、その外観を Photo. 1 に示す。この装

置を本実験で採用した理由は以下の根拠に基づくものである。

すなわち、一般に用いられる油圧式万能試験機では、ひずみ速度の調節はほとんど手動によつて行なわれ、構造上からもクロスヘッドの移動速度と試験片のひずみ速度を試験開始時から常に一定に保つことは不可能である。しかるに、本実験に使用したオートグラフ材料試験機は、広い範囲に荷重速度を変化することができ、変位測定用差動トランスを備えていて、試験中つねに一定のひずみ速度を保つようになっている。さらにクロスヘッドの移動には、自動制限装置を備えているため、本実験の目的に適合するものと考えられる。

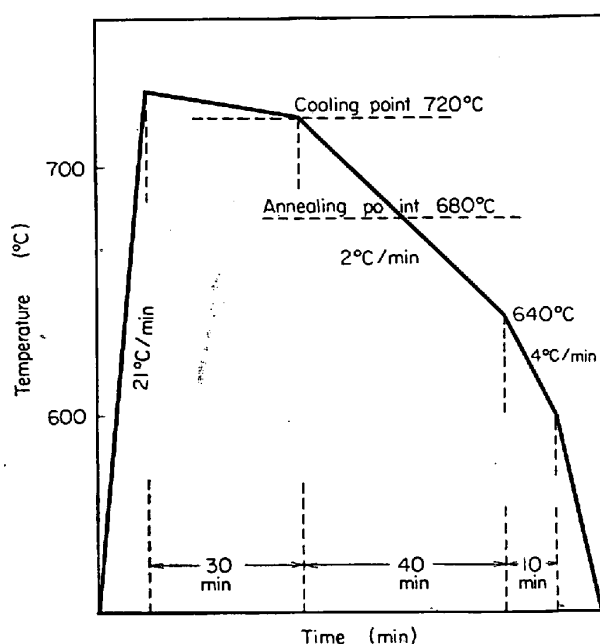


Fig. 1. Schematic diagram of heat treatment of glass specimens.

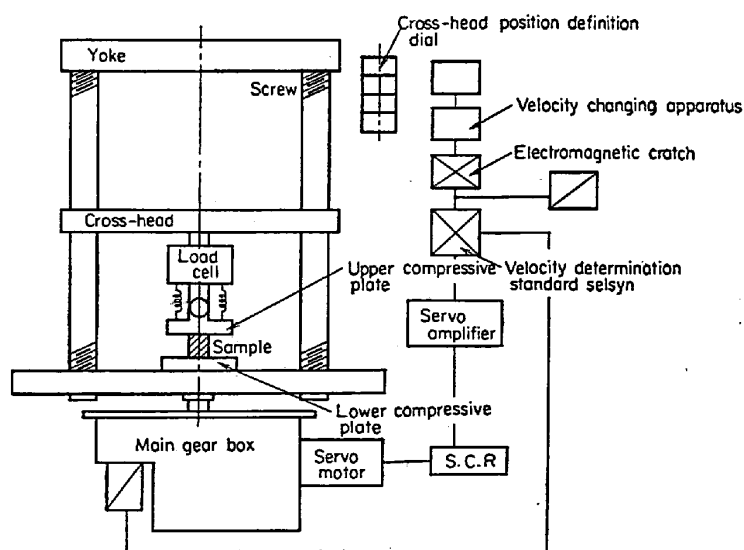


Fig. 2. Loading method.

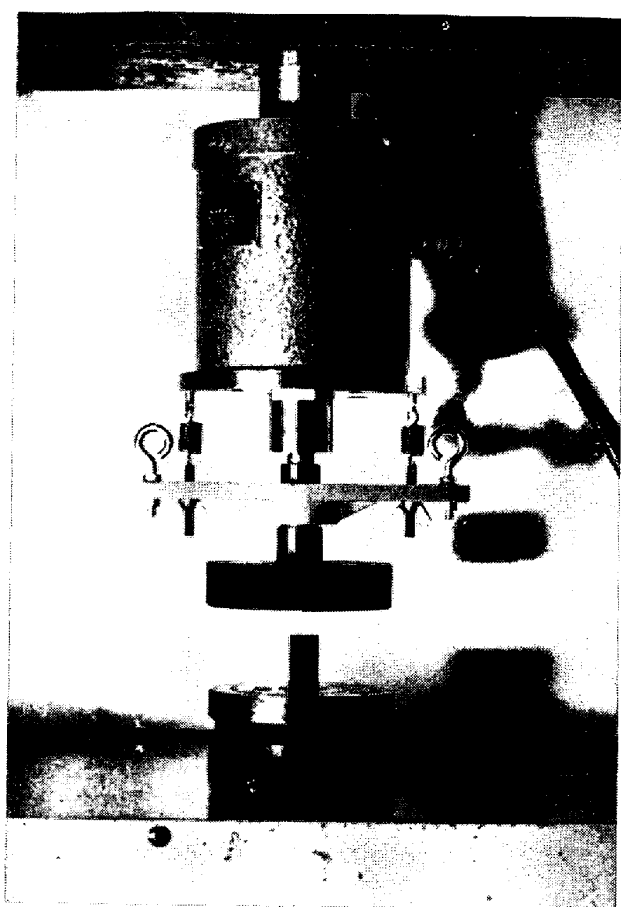


Photo. 1. C. T. type compression test apparatus.

破碎試験においては、前記の C.T. 式圧縮荷重装置の上圧板の下降に伴う試料片に対する衝撃を避けるために、クロスヘッド昇降装置で、上圧板を試料片の上面に接するまで下降させてから破碎試験を行なった。さらにクロスヘッド位置設定ダイヤルで、その下降距離を制限し、いったん破碎された破片がさらに細片化されるのを防止するようにした。

2.3 破碎産物の粒度分布

硬質ガラス、熱処理ガラスおよびインド鉄鉱石、ゴールドワージー鉄鉱石について、破碎荷重速度を種々変化して圧縮破碎を行なった場合の、破碎産物の粒度分布を測定し、破碎産物の粉化の状態を検討した。

破碎産物の粒度分布は、破碎試験を行なった試料の破片を全部注意深く回収し、同一荷重速度で行なった10回の破碎産物を1つにまとめて混合し、タイラー標準ふるいをを用いている分けを行なって測定した。

硬質ガラスおよび鉄鉱石については、一度破碎された破片がさらに破碎されることを防ぐために圧縮距離を1 mmと一定にし、荷重速度を変化して破碎試験を行なったときの破碎産物の粒度分析の結果を Fig. 3 に示す。縦軸には図中に示したふるい目を通してものの重量百分率を示し、横軸には荷重速度を示している。

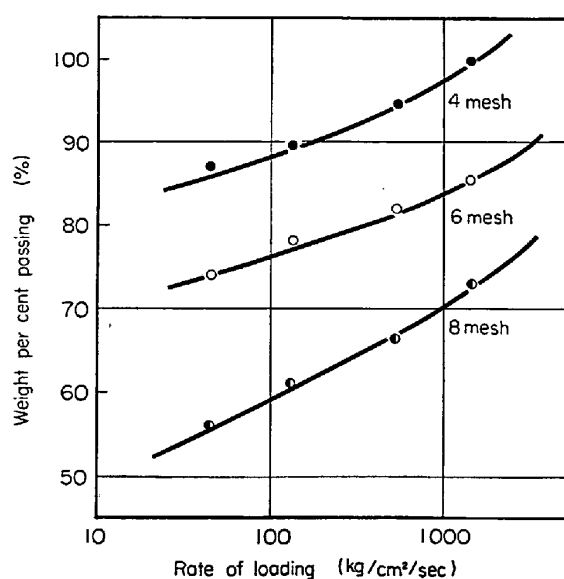


Fig. 3. Size distribution of crushed product of glass without heat treatment.

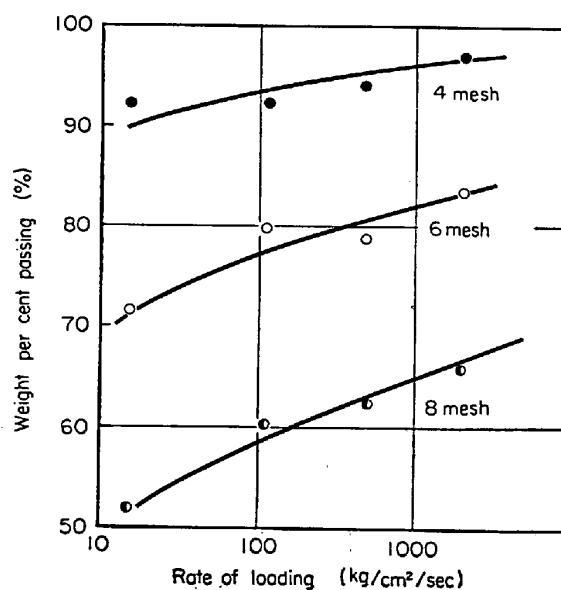


Fig. 4. Size distribution of crushed product of heat treated glass.

熱処理を行なったガラスについての、破碎試験産物の粒度分析の結果を Fig. 4 に示す。

Fig. 3 および Fig. 4 に見られるように、硬質ガラスについては、熱処理を行なわないものおよび熱処理を行なったもののいずれについても、荷重速度が大になるにしたがって微粉の生成量が増加する傾向が明りように認められる。

つぎに、ゴールドワージー鉄鉱石について破碎試験を行なった結果は Fig. 5 に示されるとおりで、鉄鉱石についても、荷重速度の増加とともに微粉の生成する割合が多くなり、荷重速度が大なる場合は破碎産物はより粉化する傾向が歴然と認められる。

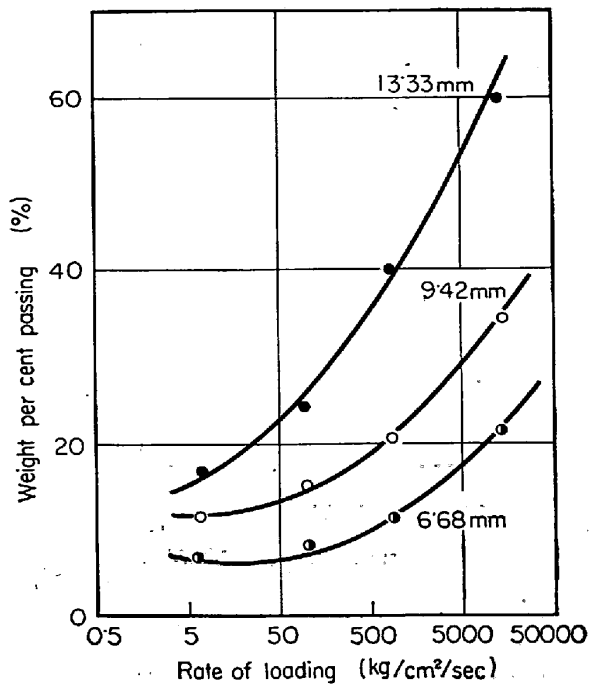


Fig. 5. Size distribution of crushed product of Goldworthy iron ore (compression length was kept constant : 1 mm).

前報¹⁾において、破碎比と破碎産物の粒度分布との間にきわめて密接な関係のあることを報告した。破碎比を変化することは、圧縮距離を変化し、それぞれの圧縮距離を同一時間で圧縮することになる。そこで、前報の実験と近似させるために、圧縮距離を 6 mm から 0.6 mm の間で変化し、それぞれの圧縮距離を 1.2 sec で圧縮するように荷重速度を変化して破碎試験を行ない、破碎産物の粒度分布を測定した。

ゴールドワージー鉄鉱石およびインド鉄鉱石についての実験結果を、それぞれ Fig. 6 および Fig. 7 に示す。これらの図に示されているように、圧縮距離を変化し、その圧縮距離を同一時間で圧縮する場合も、荷重速度の増加とともに、微粉の生成割合が顕著に増加することが認められる。

なお、Fig. 5 と Fig. 6 の結果はいずれもゴールドワージー鉄鉱石についての結果を示したものである。Fig. 5 と Fig. 6 とは縦軸および横軸の間隔が異なるので図から直ちに観察することはやや困難と思われるが、Fig. 5 の結果に比して Fig. 6 の粒度分布のほうが荷重速度の増加に従い粉砕の生成量ははるかに多いことが認められる。Fig. 6 の結果は、破碎比を変化した場合に近似させるために圧縮距離を変化し、それぞれの圧縮距離を同一時間に圧縮するように荷重速度を変化したときの破碎産物の粒度分布を示したもので、Fig. 6 における大なる荷重速度は圧縮距離が大なることを示すものである。す

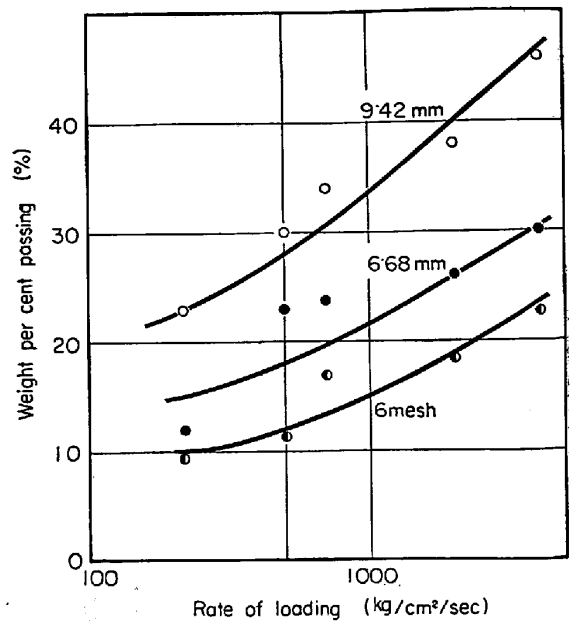


Fig. 6. Size distribution of crushed product of Goldworthy iron ore (compressing time was kept constant for each compression length).

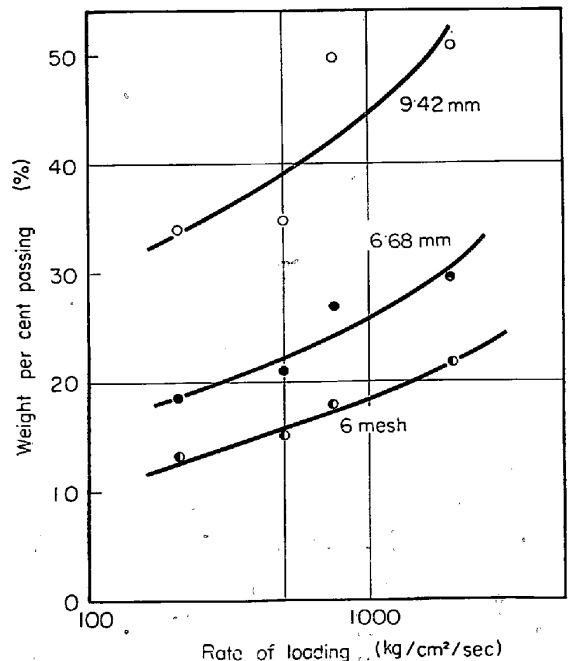


Fig. 7. Size distribution of crushed product of Indian iron ore (compressing time was kept constant for each compression length).

でに緒言において述べたように、圧縮距離が大きい場合は、一度破碎された破片がさらに再破碎され過粉碎の現象がひき起こされる。その結果、同じゴールドワージー鉄鉱石を実験の試料に使用したにもかかわらず Fig. 5 と Fig. 6 の結果の間に相違が表われたものと考えられる。

以上の実験の結果から、圧縮破碎においては荷重速度

は破碎産物の粒度分布に密接な関係があり、荷重速度の増大により、微粉の生成量は著しく増加し、粉化が促進することが認められる。

3. 荷重速度の変化と鉱石の力学的挙動

荷重速度の変化にともない微粉の生成割合が著しく変化することの原因を究明する第1着手として、荷重速度を変化した場合の鉄鉱石の力学的挙動の変化を検討することを試みた。

3.1 破壊強度およびひずみの測定

破壊強度の測定は Fig. 8 に示すような荷重計測方式により行なつた。圧縮荷重は X-T 記録装置に描かせ、クロスヘッドの下降速度が 100 mm/min 以上の高速では、X-T 記録装置が追従しないので、応力波形をシンクロスコープに描かせ、写真撮影を行なつて記録した。

Photo. 2 はその一例を示したものである。

なお、測定結果にかなりのばらつきのあることは岩石などを試料とする強度試験では避けえないことである。したがってサンプル数は統計的手順にしたがつて、同一

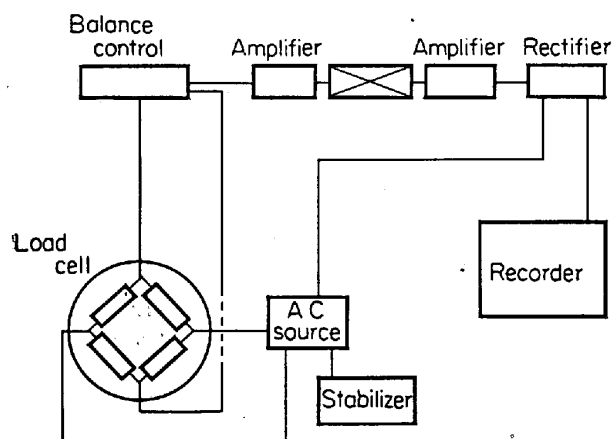


Fig. 8. Loading measurement method.

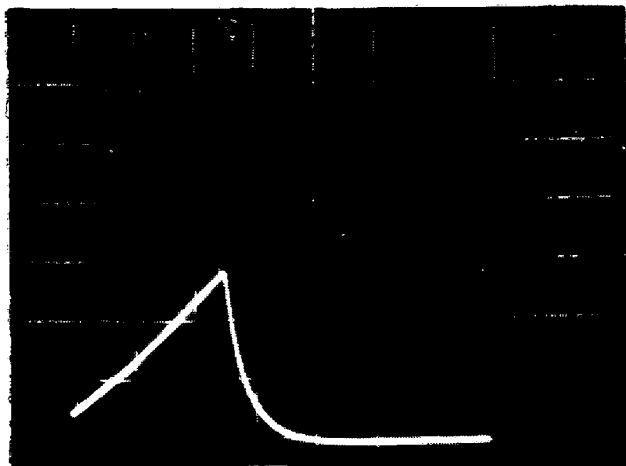


Photo. 2. An example of stress wave recorded by synchroscope.

荷重速度について 15~20 個とし、その平均値をもつて試験片の破壊強度とした。

ひずみの測定は、試験片の軸方向に試験片の相対する面にストレインゲージをそれぞれ 1 枚ずつ張り付け、これらのストレインゲージをブリッジヘッドに結線し、動ひずみ計を通して直記式電磁オシログラフに記録した。

3.2 測定結果

硬質ガラスについて、荷重速度を変化したときの破壊強度を測定した結果は Fig. 9. に示すようである。

この図の縦軸は破壊強度を示し、横軸は荷重速度および変位速度を示している。図中の破線はばらつきの範囲を示したものである。なお変位速度はひずみの測定値から算出した。

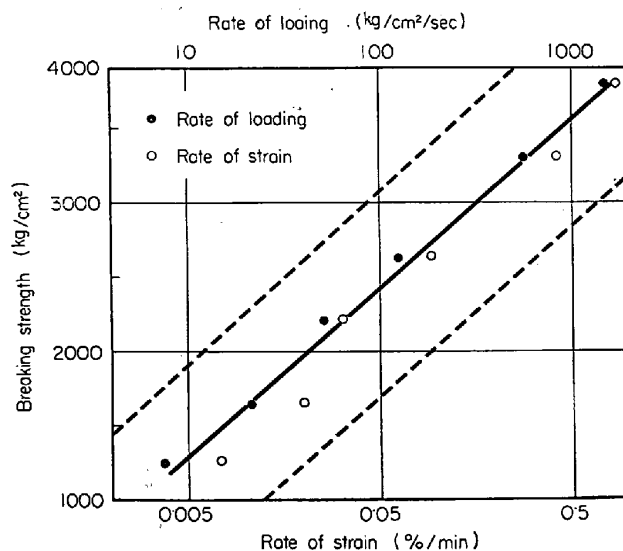


Fig. 9. Relation between rate of loading and breaking strength of glass without heat treatment.

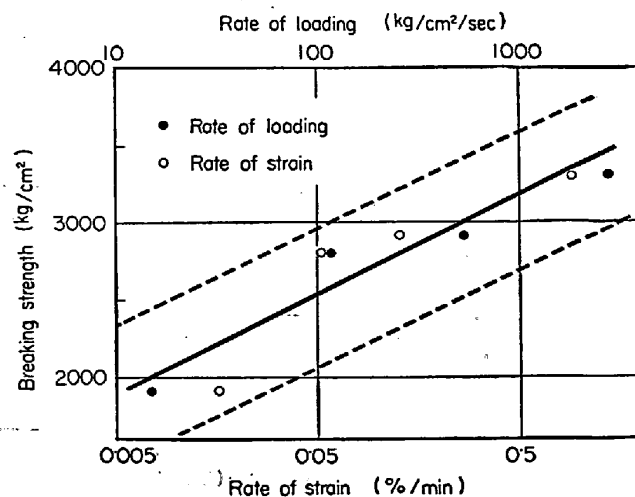


Fig. 10. Relation between rate of loading and breaking strength of heat treated glass.

Fig. 9 に示されているように、硬質ガラスについては荷重速度が低速の場合は破壊強度は約 1000 kg/cm^2 であるが、荷重速度が $1538 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ で約 3800 kg/cm^2 となり、荷重速度の増加にしたがい破壊強度は著しく上昇することが認められる。

Fig. 10 は熱処理を行なった硬質ガラスの荷重速度と破壊強度との関係を示したものである。この図に示されているように、熱処理硬質ガラスについては、破壊強度は荷重速度が $15 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ の場合は約 2000 kg/cm^2 であるが、荷重速度が $2700 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ の場合は約 3250 kg/cm^2 に上昇する。

Fig. 11 はゴールドワージー鉄鉱石についての荷重速度と破壊強度との関係を示したものである。この図に見られるように、破壊強度は荷重速度が $6.5 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ の場合は約 500 kg/cm^2 であるが、荷重速度が 5200 kg

$/\text{cm}^2/\text{sec}$ の場合は約 1000 kg/cm^2 を示している。

Fig. 12 はインド鉄鉱石についての荷重速度と破壊強度との関係を示したものである。これによると、インド鉄鉱石についても、荷重速度の増加にしたがい破壊強度が上昇することが明りように認められる。

つぎに試験片のひずみの測定の結果から、荷重速度を変化した場合の応力-ひずみ曲線を求めた。硬質ガラスについての応力-ひずみ曲線は Fig. 13 に示すようである。図中の各曲線に付した数字は変位速度を示したものである。Fig. 14 はゴールドワージー鉄鉱石の応力-ひずみ曲線を、Fig. 15 はインド鉄鉱石の応力-ひずみ曲線を示したものである。

Fig. 13, Fig. 14, および Fig. 15 に見られるように、硬質ガラス、ゴールドワージー鉄鉱石ならびにインド鉄鉱石のいずれについても、荷重速度が大になるにした

がつて、応力-ひずみ曲線は立つてくる。すなわち荷重速度が低い場合は、ひずみが大きく応力は小さい値を示すが、荷重速度が高い場合は、ひずみは比較的小さく、応力は大きい値を示している。

Fig. 13 の硬質ガラスについて見れば、 $1/2$ 応力における見かけの割線弾性係数は、荷重速度が $80 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ から $1600 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ に増加するにしたがい、約 $1.56 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ から $1.61 \times 10^7 \text{ kg/cm}^2$ へと増加することが認められる。

また、降伏強度のひずみ速度依存性については、L. PLANDTL⁶⁾ らは金属材料とくに多結晶材料について、つぎのような実験式を与えている。

$$\sigma_d = \sigma_0 + k \log \left(\frac{v_d}{v_0} \right) \dots \dots \dots (1)$$

また、その補正式として

$$\sigma_d = \sigma_0 + k_1 \log \left(\frac{v_d}{v_0} \right) + k_2 \left[\log \left(\frac{v_d}{v_0} \right) \right]^n \dots \dots \dots (2)$$

なる式も与えられている。

ここに、 σ_0 : 低速荷重速度における強度

σ_d : 任意の荷重速度における強度

v_0 : 低速荷重速度における試験片の変位速度

v_d : 任意の荷重速度における試験片の変位速度

k, k_1, k_2, n : 定数

鉄鉱石のような脆性材料の破壊強度について

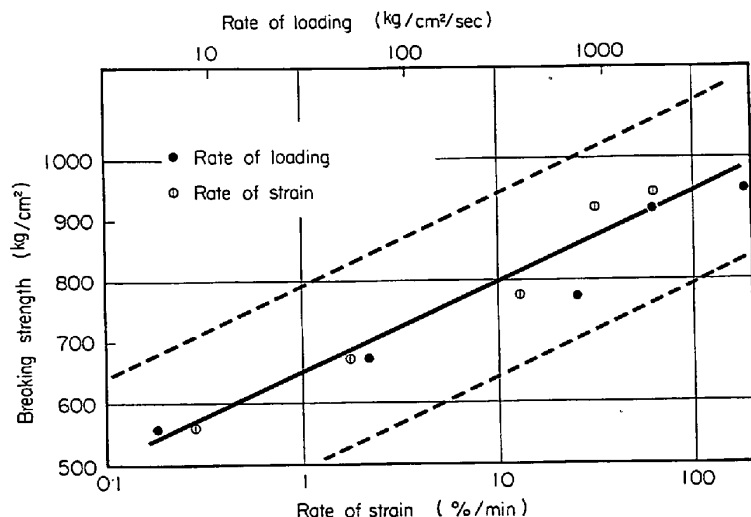


Fig. 11. Relation between rate of loading and breaking strength of Goldworthy iron ore.

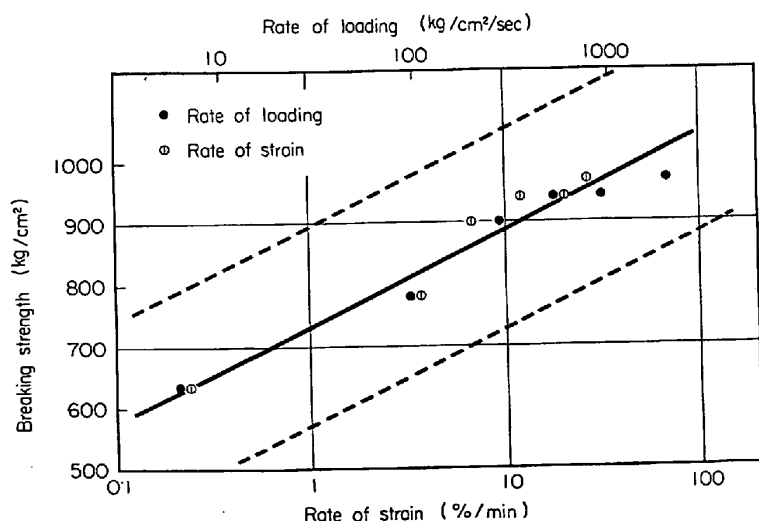


Fig. 12. Relation between rate of loading and breaking strength of Indian iron ore.

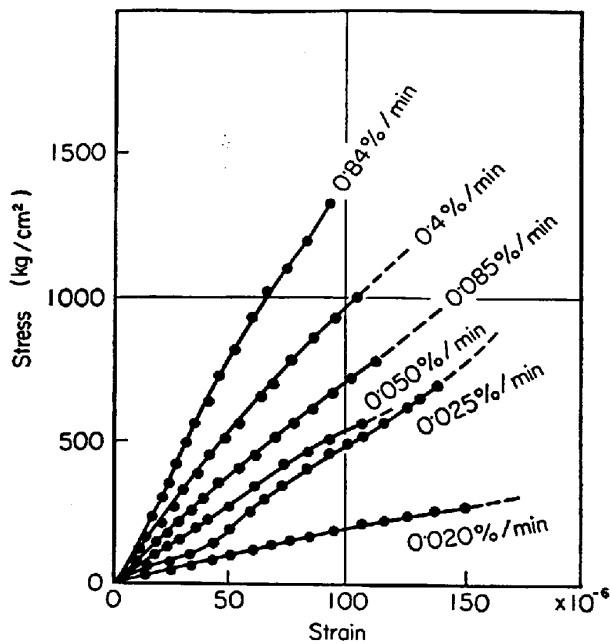


Fig. 13. Stress-strain curve of glass.

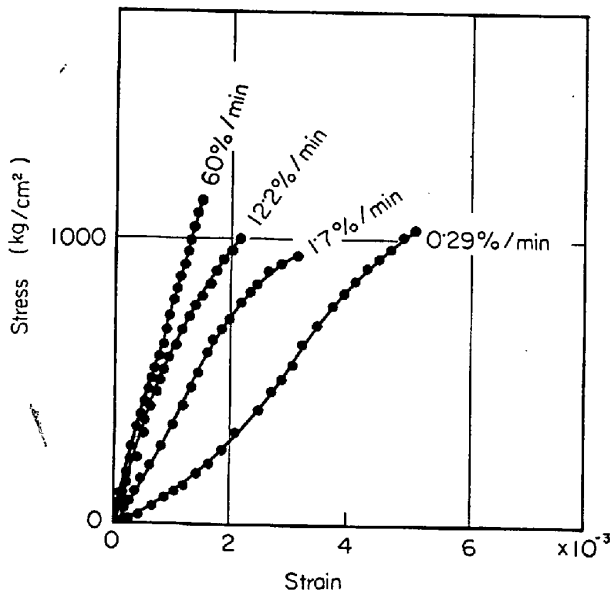


Fig. 14. Stress-strain curve of Goldworthy iron ore.

PLANDTL の関係が成立するか否かを検討した結果、ゴールドワージー鉄鉱石については

$$\sigma = 556 + 129 \log \left(\frac{v_d}{v_0} \right) \dots \dots \dots (3)$$

($v_0 = 0.085 \text{ mm/min}$)

インド鉄鉱石については

$$\sigma = 820 + 85 \log \left(\frac{v_d}{v_0} \right) \dots \dots \dots (4)$$

($v_0 = 0.85 \text{ mm/min}$)

なる関係が得られた。

すなわち、本実験の荷重速度の範囲内においては、荷

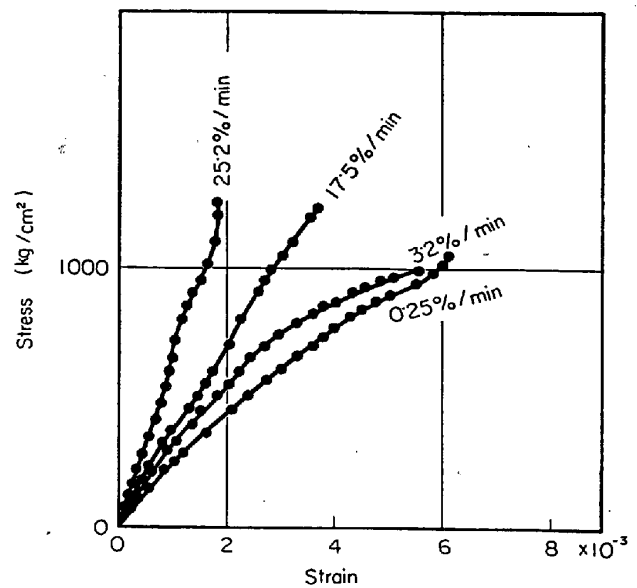


Fig. 15. Stress-strain curve of Indian iron ore.

重速度したがってひずみ速度と破壊強度との関係は(3)式および(4)式によつて示されることが確かめられた。

以上の結果から、鉄鉱石を圧縮しそれが破壊にいたるまでの力学的挙動には、荷重速度の変化にともない顕著な相違が生ずることが認められる。

試験片が破壊されて生ずる破片の大きさに対しては、破壊時における割れの進行状態が影響することが考えられる。H. SCHARDIN⁷⁾はプラスチックガラスの破壊実験から、破壊時における応力が大になるにしたがい、割れはより多く枝分かれして進行し、かつその枝分かれは割れの発生点から短い距離で始まると述べている。すなわち破壊時における応力が大であるほど、破碎産物が細片化される傾向を認めている。

本研究の実験結果に示されているように、鉄鉱石の破碎において荷重速度の増加は、同一試料については、応力-ひずみ曲線における見かけの弾性係数の増加およびとくに破壊強度の著しい増加をひき起こしている。このような力学的挙動の変化により、SCHARDIN が認めたように、破碎産物の粒度分布において微粉の生成割合の増加を生ずるものと考えられる。

以上、破碎荷重速度は破碎産物の粒度分布に著しい影響を与える重要な因子であり、整粒粉碎法の確立に対しても、粉碎機的设计に対しても、荷重速度の設定はきわめて重要な意味をもつものである。

4. 吟 味

本研究においては、圧縮破碎における破碎荷重速度が破碎産物の粒度分布に影響を与える基本的因子の1つであると考え、そのことを確かめるために実験の条件を可

能な限り厳格に規定して行なつた。したがつて実験によつて得られた結果から、圧縮破碎においては、破碎荷重速度は破碎産物の粒度分布を支配する基本的因子の1つであることが明りように確かめられた。

しかしながら、実際操業に使用されている圧縮式破碎機の圧縮板、たとえばジョークラッシャーのジョーあるいはジャイレトリークラッシャーのマントルの移動速度は 1000~3000 mm/min の範囲である。一方、本実験における破碎荷重速度は 1000 kg/cm²/sec 前後であり、この荷重速度をクロスヘッドの移動速度に換算すれば、300 mm/min になり、破碎機の移動速度の 1/3~1/10 の荷重速度になる。

破碎荷重速度が約 3~10 倍程度増加した範囲においては荷重速度の増加による岩石の力学的性質の変化に大きな異常があらわれるとは考えられないので荷重速度は破碎産物の粒度分布に影響を与え、本研究の結果は当然実用圧縮式破碎機の荷重速度の範囲まで拡大適用されうものと考えられる。しかし厳密には、さらに高速においても厳格に荷重速度を一定に維持する試験機を用いて測定を行なうことが望ましい。

5. 結 言

鉄鉱石の破碎産物の粒度分布に影響を与える因子の1つとして破碎荷重速度をとり上げ、荷重速度を種々変化した場合の、硬質ガラスおよび鉄鉱石の粉化の状態ならびに荷重速度の変化によつて生ずる鉱石試料の力学的特性を検討した。得られた結果を要約すればつぎのようである。

(1) 荷重速度と破碎産物の粒度分布との関係を検討した結果、圧縮距離を一定にして荷重速度を変化した場合、および圧縮距離を種々変化して、それぞれの圧縮距離を同一時間で圧縮するように荷重速度を変えた場合の

いずれにおいても、荷重速度の上昇とともに微粉の生成する割合が増大する傾向が明りように認められる。

(2) 荷重速度の増加にしたがい、硬質ガラスおよび鉄鉱石のいずれにおいても、破壊強度は顕著に上昇する傾向が認められる。荷重速度と破壊強度との関係は、L. PLANDTL が金属材料について与えた実験式と同様な式によつて示される。

(3) 荷重速度を変化したときの、応力-ひずみ曲線を検討した結果、荷重速度の増加にしたがい見かけの弾性係数が顕著に増加することが認められる。

(4) 荷重速度の変化にともなう鉱石の力学的挙動の変化が破碎産物の微粉化に関係するものと推察される。

以上の結果から、圧縮破碎において、荷重速度は破碎産物の粒度分布に顕著な影響を与えるきわめて重要な因子の1つであることが判明した。

本研究を遂行するにあたり、京都大学三雲英之助名誉教授のご懇篤なるご指導を受けた。実験の遂行および実験結果の検討については京都大学平修二教授のご援助を受けた。ここに深甚の謝意を表する次第である。

また、本研究を遂行するにあたり、八幡製鉄株式会社のご援助を受けた。ここに感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) 向井、一伊達: 鉄と鋼, 54 (1968) 12, p. 1232
- 2) R. J. CHARLES: Trans AIME, 205 (1956) 10, p. 1028
- 3) 中川、松居: 化学工学, 21 (1957), p. 810
- 4) 堀部、小林: 材料, 14 (1965) 141, p. 498
- 5) 下村、高多: 日本鉱業会誌, 77 (1961) 880, p. 868
- 6) A. NADAI: Theory of Flow and Fracture of Solids, 1950, p. 21, McGraw-Hill
- 7) B. L. AVERBACH: Fracture, 1959, p. 297~329, Wiley