

## 層圧縮破砕法の砕石用クラッシャへの適用性

## APPLICABILITY OF THE BULK COMPRESSION METHOD TO THE USUAL CRUSHERS FOR CONCRETE AND ROAD CONSTRUCTIVE CRUSHED STONE

木 山 英 郎\*・藤 村 尚\*\*・岡 行 俊\*\*\*

By Hideo KIYAMA, Hisashi FUJIMURA and Yukitoshi OKA

## 1. はじめに

砕石は、道床材や路盤材として優れた性質を有することが認められてきたが、最近では天然骨材の枯渇とともにコンクリート用およびアスファルト用骨材としても多用されるようになってきた。

それらの基本的な品質規格は、JIS A 5001 道路用砕石および JIS A 5005 コンクリート用砕石にみられる。たとえば、「原石および製品の材質」、「粒径範囲による区分と所要の粒度分布」および「うすつべらな、あるいは細長い石片の有害量の制限と粒形判定実積率の採用」など細かく規制されている。したがって砕石用クラッシングプラントにおいては、これらの砕石条件を満たすように機種を選定をはじめ、最適の破砕回路を設計することが肝要である。

現在一般に使用されている砕石用破砕機を、破砕機構と破砕工程で大別すれば、次のような特徴を挙げることができる。大容量の圧縮型破砕機は、一次破砕（粗砕）および二次～三次破砕（中砕）に用いられ、原料寸法と産物寸法の比を表わす破砕比を大きくとれる利点を有するが、コンクリート用あるいは道路用砕石に必要な細粒度（5～20 mm）産物の生産や産物粒形の整形作用を期待できないという短所を有する。一方、衝撃型破砕機や磨砕型破砕機は、細粒度産物の生産や整形作用に富むが、機構上破砕比を大きくとれないという短所を有するため、三～四次破砕（細砕）および砕砂用粉砕機として用いられる。したがって、通常の砕石用クラッシングプラントにおいては、破砕工程の各段階に応じて、それに適した 2～4 種の破砕機を組合わせて用いざるを得ないというのが現状である。

そこで破砕工程を単純化して、砕石作業を能率よく行うためには、ジョークラッシャやコーンクラッシャに代表される圧縮型破砕機を用いて、大粒径の原料から能率よく粗粒度産物を得る方法、できれば整形作用も併せもつ方法の開発が望まれる。従来の概念からすれば、これら圧縮型破砕機を用いて細粒度産物を得る場合には、産物粒度に合わせて出口すきまを小さくして破砕する方法が常識とされてきた。この方法では、出口すきまを小さくした分だけ流量（破砕処理量）が少なくなるばかりでなく、一般に過粉砕を生じ易く、かつ湿潤原料の場合には居付きや閉塞によって過大な荷重を生じ安定した運転が困難になるといった欠点があった。これらの欠点を除去するために、破砕室形状の改良や原料の供給方法の改善など多くの工夫がなされてきたが、出口すきまを小さくして破砕する限りはその効果に限度のあることは否めなかった。

そこで細破砕におけるこれらの問題点を根本的に解決するために、まず出口すきまを大きくして流量と安定性を増し、そのうえで所期の細粒度産物を得る破砕条件を明らかにすることが必要である。この観点から圧縮型破砕機における破砕挙動を、静的な粒子層圧縮試験にモデル化し、産物粒度・粒形および破砕エネルギーの面から考察を加えるのが本研究の目的である。ここに、単粒子層に近い層圧縮破砕法は出口すきまを製品最大寸法に合わせてセットする従来の破砕法を代表し、一方、多粒子層を用いる層圧縮破砕法は出口すきまを十分に大きくセットして細破砕を目指す筆者らの破砕法を表わす（Fig. 1 参照）。

本論文は、これらの検討を通じて、圧縮型破砕機による能率のよい細破砕の方法と整形破砕の可能性について報告する。

\* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 鳥取大学助手 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部資源工学科

2. 実験概要

Fig. 1 に示す層圧縮破砕法による細破砕の可能性と、そのエネルギー的評価および整形作用の良否を検討するため、以下の実験を行った。すなわち、Fig. 2 に示す層圧縮試験において供給試料の層厚ならびに最大荷重を変化させ、荷重-変位曲線から破砕入力エネルギーを算定するとともに、破砕後試料（以下、破砕産物とよぶ）の粒度分析結果から粒度分布特性や理論破砕エネルギーを算定した。また、破砕前後の試料の単位体積重量および粒形の測定を行って、実積率や粒子形状特性から層圧縮破砕法における整形作用を検討した。試料種別、試験条件、および測定法の一覧を Table 1 に示す。

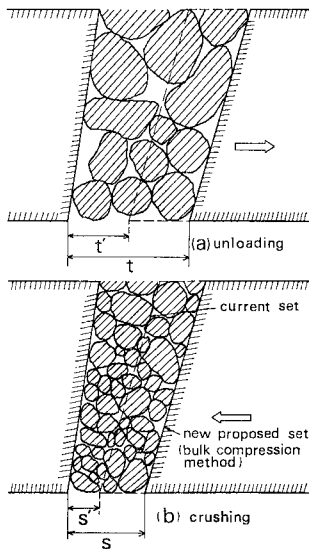


Fig. 1 Schematic illustrations of the bulk compression method in a compressional type crusher.

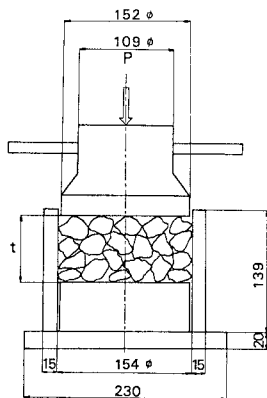


Fig. 2 The bulk compression test, modification of B.S. 812 test.

(1) 試料

試料は、花崗岩、安山岩、砂岩の3種類の岩石について、試料粒径  $d_f$  が 20~10 mm, 10~5 mm の2種類の単粒度のものを用いた。試料数は後述の試験条件につき2個とし、その平均値を代表値とした。試料岩石の物理的性質を Table 2 に示す。

(2) 層圧縮試験

層圧縮試験は Fig. 2 に示すように、B.S. 812-1951 骨材試験に準じて行った。多粒子層圧縮の効果をみるために試験用円筒容器内の試料層厚  $t$  は 70 mm, 50 mm, 30 mm の3水準を設定し、最大荷重  $P_{max}$  は 40 t (応力換算=215 kg/cm<sup>2</sup>) と 10 t (=53.7 kg/cm<sup>2</sup>) の2水準を用いた。

荷重-変位曲線は電子管式 100 t 万能試験機の記録計を用いて測定した。これから破砕入力エネルギーを算定するための面積計測には、自動面積計（測定誤差 ±1% 以内）を用いた。

(3) 粒度分析

破砕産物の粒度分布は、JIS A 1102 の規定に従って、10, 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15 mm のふるい分け試験で求めた。

(4) 単位体積重量, 実積率

破砕産物の粒子形状を評価するのに、実積率を用いる方法が JIS A 5005 コンクリート用砕石に規定されている。ただし、この粒形判定実積率の規定は、2005 砕石（粒度範囲 20~5 mm）にのみ適用されている。本実験における破砕産物の粒度範囲はこれより小さいため、上記

Table 1 Samples, conditions and measurements of the bulk compression test.

<b>Samples</b>	
kind of rock :	granite, andesite, sandstone
grain size $d_f$ :	20~10 mm, 10~5 mm
<b>test conditions</b>	
maximum load $P_{max}$ :	40 t, 10 t
thickness of bulk feed samples $t$ :	70 mm, 50 mm, 30 mm
<b>measurements</b>	
load-displacement curve	
sieve analysis	
unit weight, percentage of absolute volume	
grain shape measurement	

Table 2 Physical properties of samples.

	specific gravity of absolute dry condition $G$	compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	tensile strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Young's modulus ( $\times 10^4$ kg/cm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio
granite	2.67	2 540	156	85.0	0.251
andesite	2.64	2 640	193	72.0	0.231
sandstone	2.63	1 740	146	41.3	0.203

規定に準じて粒形判定用の実積率を以下のようにして算定した。

まず、破砕産物から微細粒度分（供給試料寸法 20~10 mm に対しては 2.5 mm 以下、10~5 mm に対しては 1.2 mm 以下の産物）を取除き、JIS A 1104 の規定に準じた単位容積重量試験を実施した。この値から実積率は次式で算定した。

$$\text{実積率 (\%)} = \frac{\text{単位容積重量 (kg/m}^3\text{)}}{\text{比重} \times 1000} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

(5) 粒形測定

破砕産物の粒子形状は万能投影機を用いて計測した。試料は、各試験条件ごとに 40 個の粒子を任意抽出して使い、それぞれ最大径 *a*、中間径 *b*、短径 *c* を測定し、粒子形状は扁平率 *c/b* および細長率 *b/a* で表した。

3. 破砕産物の粒度分布と粒子形状の評価

(1) 破砕産物の粒度分布

層圧縮試験における破砕産物の粒度分析結果を花崗岩について図示すると Fig. 3 のようである。試料粒度 *d<sub>f</sub>*、最大荷重 *P<sub>max</sub>* および層厚 *t* の種々の組合わせによる産物粒度分布の特徴を以下に示す。

層厚 *t* による差は、*t*=70 mm より 50 mm、50 mm より 30 mm と、単粒子層圧縮に近づくほど細粒度産物量

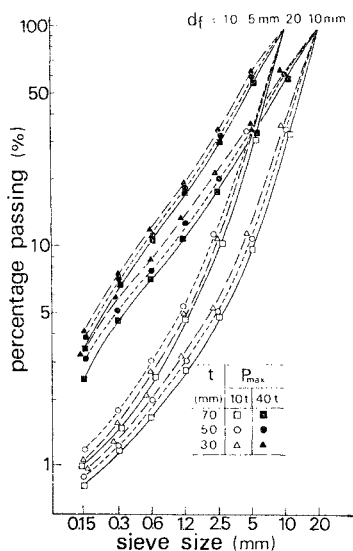


Fig. 3 Gradings of products under different test conditions (for the granite samples).

を増す傾向を示すが、その差はわずかである。またこのことは他の条件が変化してもほとんど変わらない。

最大荷重 *P<sub>max</sub>* が 10 t か 40 t かによる差は明瞭であり、*P<sub>max</sub>* が大なるほど破砕が進行する。ただし、この点に関しては破砕エネルギー効率の面からの検討が重要であり、後述する。

一方、供給試料粒度 *d<sub>f</sub>* が 20~10 mm か 10~5 mm によって、産物粒度が異なるのは当然のことであるが、両者の対応する粒度分布曲線がほとんど平行に近い関係を示す点が注目される。すなわち、20~10 mm 試料と 10~5 mm 試料について、層厚および荷重条件を等しくして破砕すれば、同一破砕比の産物を得ることを示している。したがって、この程度の試料粒度範囲では、試料や産物の寸法そのものを考える必要はなく（寸法効果の無視）、両者の比を表す破砕比を用いて考察すればよい（粒径の無次元化）といえる。

岩石の種類による産物粒度分布の相違を Fig. 4 に示す。同一圧縮条件において、花崗岩に比べると砂岩ついで安山岩がやや細粒化され易いことを示している。これは、Table 2 に示した岩石の強度の大小に対応している。

その他の点については、最大荷重 *P<sub>max</sub>* の影響（図中の白抜き印と黒ぬり印）および試料粒度 *d<sub>f</sub>* の相違による産物粒度分布曲線の平行性（図 (a) と (b)）、および層厚 *t* の影響（図は省略）は、先に花崗岩について述べたことが安山岩、砂岩についても成立する。したがって、層圧縮試験における岩石の種類による粒度分布の差

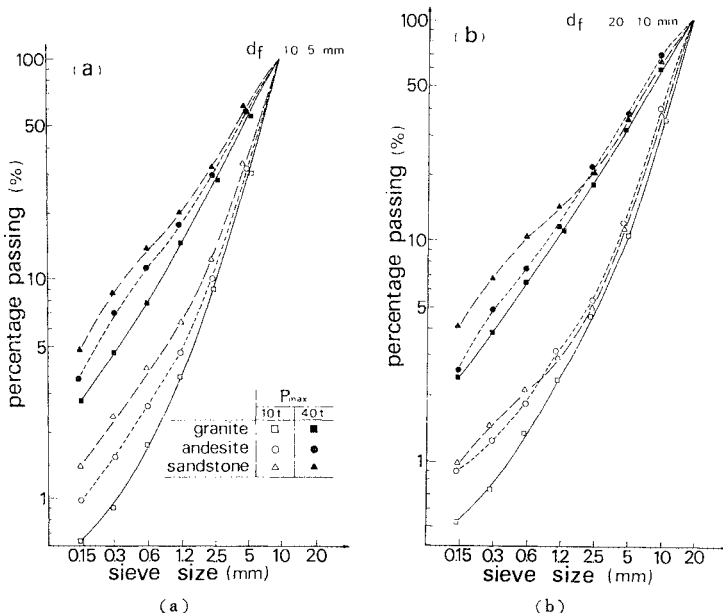


Fig. 4 Gradings of products for the three kinds of rocks under the same test conditions.

は微少であるといえる。

(2) 粒子形状

Fig. 5 は花崗岩  $d_f=20\sim 10$  mm 試料について、層圧縮試験前および後の粒子寸法の測定結果から、扁平率  $c/b$ 、細長率  $b/a$  を求めて図示したものである。Zingg<sup>1)</sup> は、両軸と  $2/3(=0.66)$  で交わる線分によって4領域に分割し、それぞれに属する粒子形状を葉状(A)、板状(B)、棒状(C)、塊状(D)とよんでいる。図から、層圧縮試験による破碎産物の粒形が、いずれの産物粒径についても破碎前試料に比べて、全体として塊状側に移行していることがわかる。

そこで、各粒度における粒子群の粒形を代表するパラメータとして、平均扁平率  $(\bar{c}/\bar{b})$  と平均細長率  $(\bar{b}/\bar{a})$  およびその点から各粒子点への平均半径  $\bar{r}$  を導入する。ここに、 $\bar{r}$  は次式で与えられ、粒子群の粒形のばらつきを表す尺度となる。

$$\bar{r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{ [(c/b)_i - (\bar{c}/\bar{b})]^2 + [(b/a)_i - (\bar{b}/\bar{a})]^2 \}}{N}} \dots\dots\dots (2)$$

これらの値を用いて、層圧縮試験による粒形の変化を表示したのが Fig. 6 である。

以上の結果から、層圧縮試験における破碎産物の粒形の特徴をまとめると次のようである。

① 層厚による差違は  $t=70\sim 30$  mm ではほとんど認められず、いずれの層厚においても破碎産物の粒形の塊状化が行われる。

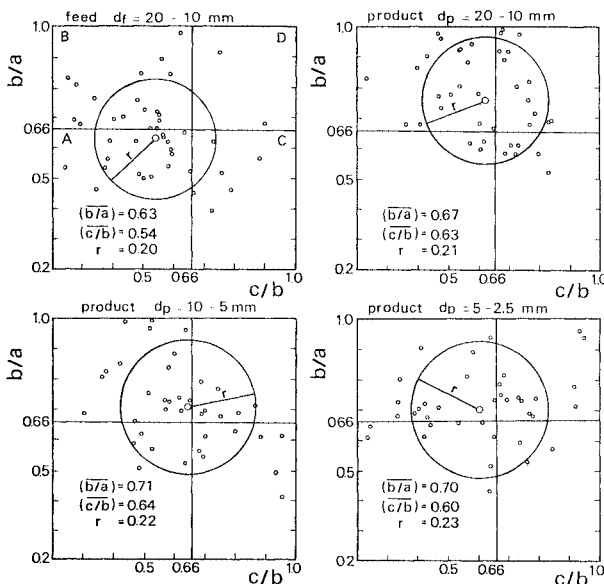


Fig. 5 Particle shape analysis of feeds and products for the granite sample under the conditions of  $t=70$  mm and  $P_{max}=40$  t.

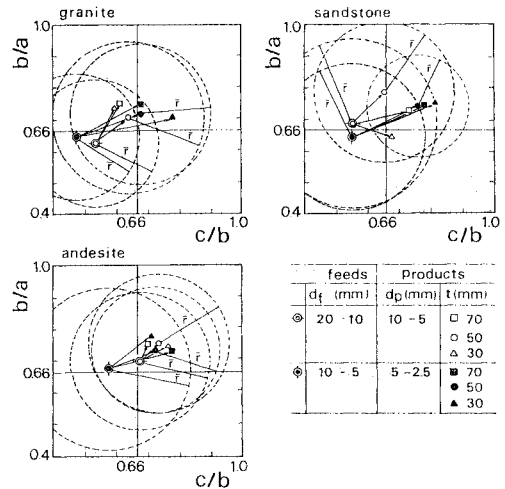


Fig. 6 Particle shape reformations between the feeds and products, as shown in average elongation ratio  $(\bar{b}/\bar{a})$  and flatness ratio  $(\bar{c}/\bar{b})$  ( $P_{max}=40$  t).

② 最大荷重  $P_{max}=10$  t と 40 t, および供給試料粒度  $d_f=20\sim 10$  mm と  $10\sim 5$  mm 間の差も少なく、これらすべてにおいてほぼ同様な塊状化が認められる。

③ 上記 ①, ② の事項は花崗岩, 安山岩および砂岩のいずれの岩種についてもほぼ同様に成立する。

④ 上記産物粒形の塊状化は、今回測定されたいずれの産物粒度 ( $20\sim 10, 10\sim 5, 5\sim 2.5$  mm) についてもほぼ同様に認められるが、粗粒度のものほどやや塊状化が先行するようである。

⑤ 産物粒形のばらつきの程度を表わす平均半径  $\bar{r}$  は、層厚, 最大荷重, 試料粒度によってほとんど変わらず、花崗岩および安山岩においては破碎前試料のそれと大差がなく、砂岩においてのみ  $\bar{r}$  の顕著な減少が認められる。

以上の事実から、層圧縮破碎法においては岩種, 試験条件にかかわらず、産物粒子は試料粒子の形状のばらつきを含みながらも、全体として塊状化されるといえる。破碎産物の粒子形状の一例を Photo 1 に示す。

(3) 実積率

各試料の層圧縮試験前・後の単位体積重量および実積率を Fig. 7 に示す。

図から層圧縮試験における破碎産物の実積率あるいは単位体積重量は、試料粒度  $d_f=20\sim 10$  mm と  $10\sim 5$  mm, 層厚  $t=70$  mm と 50 mm, および岩種によって大差がなく、最大荷重の増加とともに増大する。すなわち、破碎前試料の実積率 51~53% (ただし、単粒度である) から、最大荷

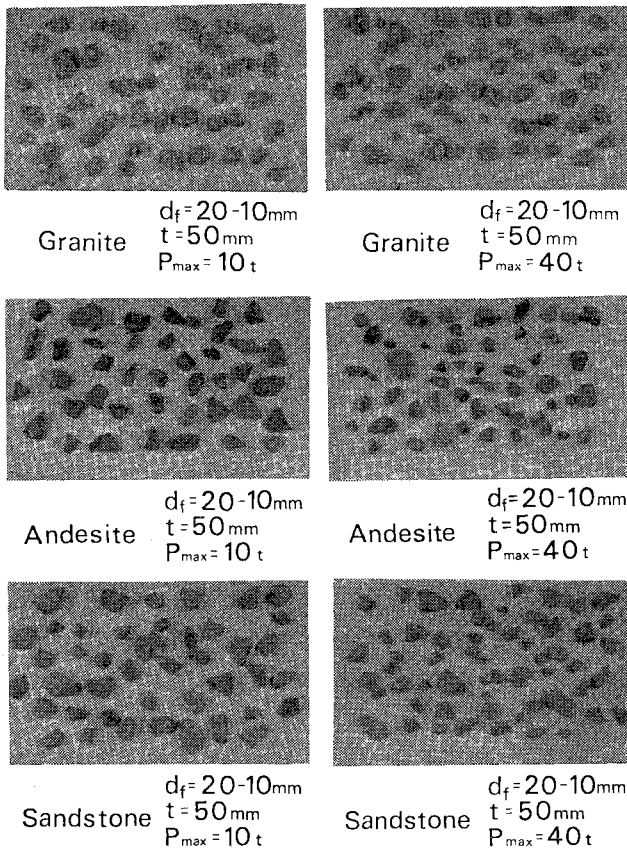


Photo 1 Products of the bulk compression method.

重  $P_{max}=10\text{ t}$ 、産物の実積率 56~60%、 $P_{max}=40\text{ t}$  産物の実積率 62~66% へとそれぞれ増大する。このことから層圧縮破砕によって得られる産物は、全体的に細長いあるいはうすっぺらな石片の少ない、粒形のよいものであると判断され、最大荷重 10 t においてすでにこの条件を満たしている。

以上、粒形ならびに実積率に関する検討結果から、供給試料  $d_f < 20\text{ mm}$ 、層厚  $t > 30\text{ mm}$  および最大荷重  $P_{max} > 10\text{ t}$  (応力換算=53.7 kg/cm<sup>2</sup>) の条件の層圧縮破砕方式によって、実用上十分な整形作用が期待できると結論される。

#### 4. 破砕入力エネルギーの評価

##### (1) 破砕入力エネルギーと産物粒度

層圧縮試験における荷重-変位曲線の一例を Fig. 8 に示す。図は花崗岩、 $d_f=20\sim 10\text{ mm}$  試料についての結果であり、実線は最大荷重  $P_{max}=40\text{ t}$ 、破線は  $P_{max}=10\text{ t}$  の場合を表す。図の曲線と横軸で囲まれた面積を、自動面積計で測定して得られる仕事量を以後、破砕

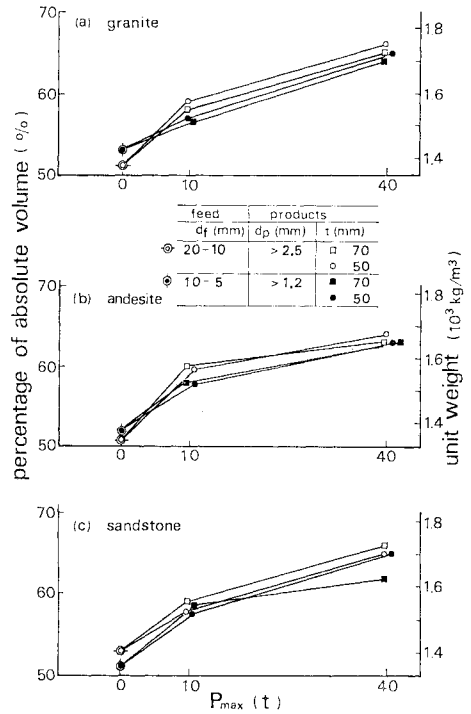


Fig. 7 Percentages of absolute volume of the feeds and products.

入力エネルギーとよぶ。

Fig. 9 は、こうして求めた単位処理重量当りの破砕入力エネルギーを横軸に、破砕産物の各ふるい通過重量百分率を縦軸にとって示したものである。いずれの産物粒度についても、破砕入力エネルギーの増加とともに産物重量が増大する。通常の破砕過程において、破砕条件が同一であれば、破砕入力エネルギーと産物重量が両対数方眼紙上でほぼ直線関係をなすことが知られており、層圧縮破砕法についてもこのことは

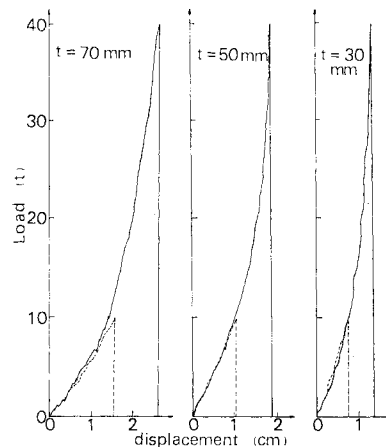
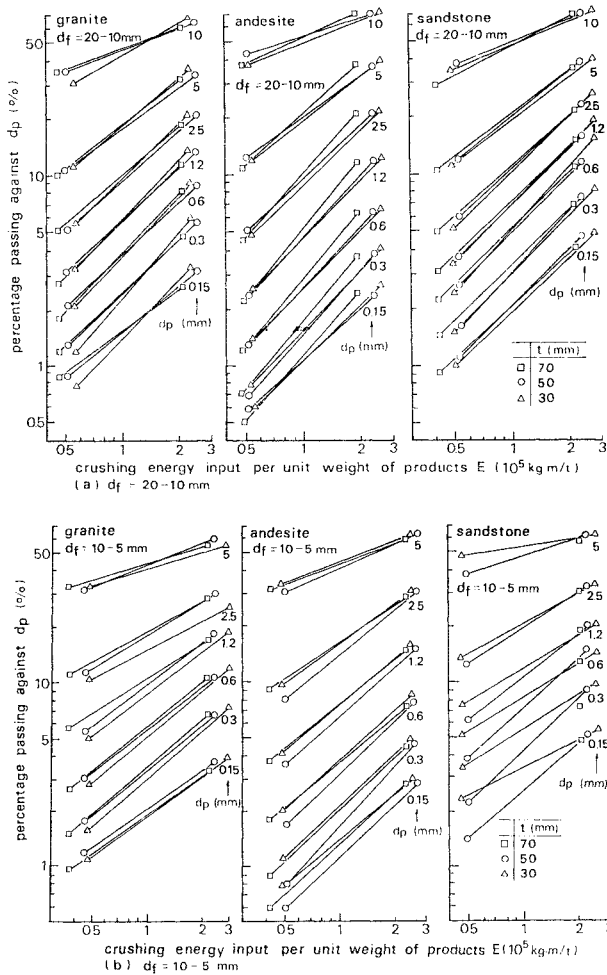


Fig. 8 Load-displacement curves for the granite samples,  $d_f=20\sim 10\text{ mm}$ .



**Fig. 9** Relationships between the crushing energy input determined by the load-displacement curve and the percentage passing plotted against each product size  $d_p$ .

確かめられている<sup>2)</sup>。したがって、**Fig. 9**においても、この直線関係が存在するものとして図示してある。

図から、まず本実験における単位処理重量当りの破碎入力エネルギーと産物重量のなす直線がいずれの産物粒径  $d_p$  についてもほぼ平行関係を示すことが挙げられる。すなわち、層圧縮試験においては、入力エネルギーと破碎産物量とは次式の関係満足する。

$$\log y = a \log x + b \dots \dots \dots (3)$$

ここに、

$y$  : 各ふるい通過重量 (%)

$x$  : 単位処理重量当りの破碎入力エネルギー (kg·m/t)

$a, b$  : 実験定数

直線の平行性から、すべての産物粒径に対して勾配  $a$  はほぼ一定値をとると考えてよい。したがって適当な層厚

$t$  と最大荷重  $P_{max}$  (両者によって入力エネルギーが定まる) を用いて、層圧縮破碎方式により任意の粒径の細粒度産物を得ることが可能である。

ところで、上式において、係数  $a$  は一種の破碎効率を表し、 $a=1$  のときは破碎入力エネルギーと産物重量は正比例し、 $a > 1$  のときは1回の圧縮破碎行程における入力エネルギーを増すほど破碎効率がよく、逆に、 $a < 1$  のときは破碎入力エネルギーを小さくするほど効率がよいこととなる。**Fig. 9** に示したように、層圧縮破碎法における勾配  $a$  は、試料岩石の種類、試料粒径  $d_f$  によってやや異なるが、ほぼ1ないしそれ以下であって、いずれの試料についても1回の圧縮行程における入力エネルギーは少ない(たとえば、最大荷重あるいはストロークをむやみに大きくとらない等の処置)方が好ましいという結果を示している。

一方、破碎機の単位時間当りの産物重量は、破碎機の処理流量 (= 破碎処理重量/時間) に比例するから、一定の(産物重量)/(時間)を得るためには、1回の圧縮破碎行程当りの産物重量 (**Fig. 9** の縦軸) と破碎機処理流量の組合わせが、それを満たすものでなければならないという条件が付される。

したがって、エネルギー効率のよい破碎を行うためには、所期の処理流量を得られる範囲内で1回の圧縮行程当りの産物重量 (**Fig. 9** の縦軸) を小さくとり、それによって定まる破碎入力エネルギー (横軸) を満足するように、適当な層厚および最大荷重の組合わせを決定(実際には、これによって最終的に処理流量が定まる)しなければならないといえる。

なお、上記のごとくエネルギー効率のよい層圧縮破碎方式を求めれば、その破碎方式からして当然のことながら、1回の圧縮工程における未破碎量が30~70% (**Fig. 3** および **Fig. 9** 参照) と多くなり、実操業にあたっては繰返し試料量の比率が在来法に比して大きくなる点に注意が必要である。

## (2) 小型ジョークラッシャによる試験破碎

前節までに述べた層圧縮試験の破碎機構を、実操業の破碎機に適用できるかどうかを検討するため、小型ジョークラッシャを用いて試験破碎を行った。結果の一例として砂岩、 $d_f=40\sim10$  mm,  $20\sim5$  mm および  $10\sim2.5$  mm の3種類の試料について、**Fig. 9** に対応する単位処理重量当りの破碎入力エネルギー\* (次頁) ~産物通過重量% の関係を **Fig. 10** に示す。この場合、層圧縮破碎

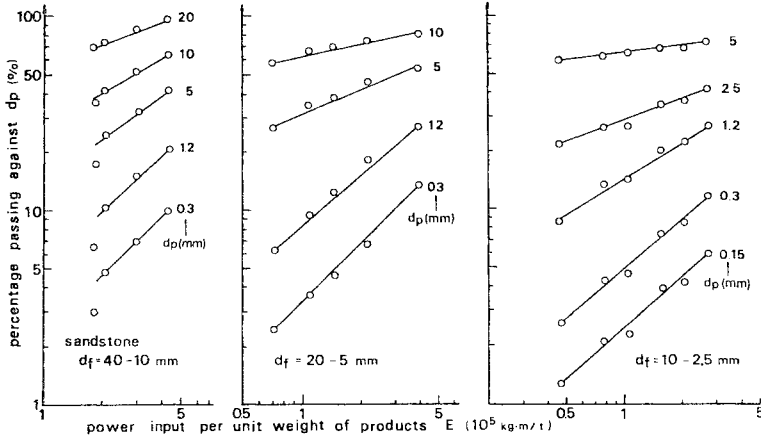


Fig. 10 Relationships between the power input and the percentage passing plotted against each product size  $d_p$ , obtained by a small Jaw crusher test.

を行わせるため、産物粒径  $d_p < 5$  mm に対して出口すきまを 13 mm, 18 mm あるいは 23 mm と十分に大きく設定した。

図から、前節の静的な層圧縮試験 (Fig. 9) で仮定した直線関係が、いずれの産物粒径についても成立していることが確認される。さらに、両図において、対応する各産物粒径の破砕入力エネルギー～産物通過重量直線は、ほぼ完全に一致することがわかった。

これらの事実から、実操業のクラッシャにおいても出口すきまを適切に設定することによって層圧縮破砕が可能であり、その破砕エネルギーは静的な層圧縮試験によって評価できることがわかった。なお、出口すきまを産物粒径に合わせて小さくする従来の破砕方式に比べて、ここで用いた層圧縮破砕方式の方がエネルギー的にみて破砕効率の数段優れていることも同時に確認された<sup>2)</sup>。

### 5. 破砕エネルギー式

#### (1) 破砕理論とエネルギー式

前章までにおいて重要な役割を果たした破砕入力エネルギーは、実験室的規模では直接荷重-変位曲線から算定される。これが実操業においては、破砕機ごとに (破砕機

注 \* ジョークラッシャの実動力は、回転軸にとりつけた電気動力計を用いてトルクと回転数から求められる。そこであらかじめ電動機入力とクラッシャ実動力との関係式 (クラッシャ回転数の関数となる) を求めておく。試験破砕にあたっては、単位処理重量当りの電動機入力から無負荷時の電動機入力を差し引いたものを電動機の実入力とし、これから上述の関係式を用いて破砕時のクラッシャ実動力を求め、破砕入力エネルギーとした。なお試験方法の詳細は著者の 1 人 (岡) ちによって別に報告<sup>2)</sup> されている。

実動力)/(産物重量) の形で定義され、かつ一般に使用されている。ところが、破砕回路の設計や個々の破砕機の導入時はおもろのこと、破砕回路の一部手直しや破砕機運転条件の変更、あるいは試料岩石の種類や粒度、乾湿状態の変化などによっても、この破砕エネルギーは大きく変化し、あらかじめその変化を予測することは困難である。

そこで、従来から破砕エネルギーを試料岩石の強度や破壊特性と結んで、与えられた岩種、試料粒度、産物粒度などから、破砕エネルギーを理論的に算定しようとする

試みが数多くなされてきた。その中で代表的な破砕理論は、Rittinger の説、Kick の説および Bond の説とよばれるもので、それから得られる破砕エネルギーは Lewis らによって次の形の数式にまとめられた<sup>3)</sup>。

$$dE = C \frac{dx}{x^n} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $E$  は単位重量の粒子の破砕に要するエネルギー、 $x$  は粒子の寸法、 $C$  および  $n$  は各破砕エネルギー説を特徴づける定数である。

式 (4) において、 $n=1$  とおき積分すれば Kick の説を表し、

$$E_1 = C_1 \log(x_f/x_p) \dots\dots\dots (5)$$

$n=1.5$  の場合が Bond の説を表し、

$$E_2 = C_2 (1/\sqrt{x_p} - 1/\sqrt{x_f}) \dots\dots\dots (6)$$

$n=2$  の場合が Rittinger の説を表し、

$$E_3 = C_3 (1/x_p - 1/x_f) \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここに、 $x_f$  は供給試料の粒子寸法、 $x_p$  は産物の粒子寸法を表す。

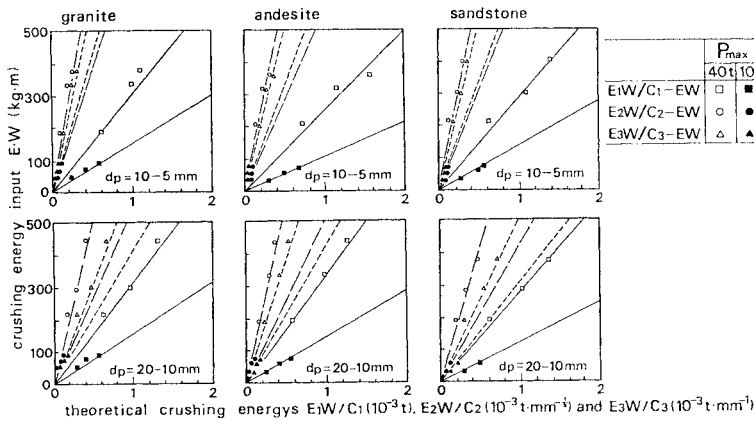
#### (2) 破砕エネルギー式の検討

上記した 3 種類の破砕理論式 (5)~(7) の適用性を検討するため、層圧縮試験における産物粒度分布から破砕エネルギーを計算した。たとえば、花崗岩  $d_f=20\sim 10$  mm 試料の  $t=70$  mm,  $P_{max}=40$  t の場合について、その計算手順を示すと Table 3 のようである。

まず、試料粒径  $x_f$  から各産物粒径  $x_p$  へ破砕するのに要する単位エネルギーは、式 (5)~(7) によってそれぞれ表 (a) 欄に示す値となる。一方、上記花崗岩の破砕産物について、各粒径ごとの重量百分率を示すと表 (b) 欄のようである。この結果、(a), (b) 両者の積として表 (c) 欄に示す単位重量当りの破砕エネルギーの値が算定

**Table 3** An example for theoretical crushing energy calculations by Eqs. (5)~(7).  
(The granite sample  $d_f=20\sim 10$  mm,  $t=70$  mm, and  $P_{max}=40$  t)

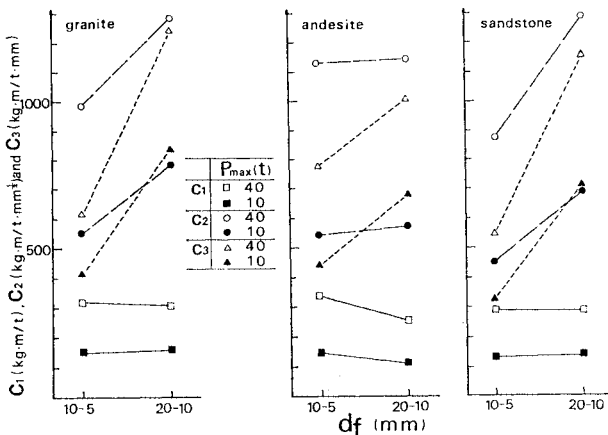
$d_f$ (mm)	$x_f$ (mm)	$d_p$ (mm)	$x_p$ (mm)	(a) unit energy			(b) weight percent (%)	(c) energy fraction		
				$E_1/C_1$	$E_2/C_2$ (mm <sup>-1/2</sup> )	$E_3/C_3$ (mm <sup>-1</sup> )		$E_1/C_1$	$E_2/C_2$ (mm <sup>-1/2</sup> )	$E_3/C_3$ (mm <sup>-1</sup> )
20~10	15	20~10	15	0	0	0	41.6	0	0	0
		10~5	7.5	0.693	0.107	0.066	27.7	0.192	0.029	0.018
		5~2.5	3.75	1.386	0.208	0.199	13.6	0.189	0.035	0.027
		2.5~1.2	1.85	2.092	0.477	0.473	6.8	0.142	0.032	0.033
		1.2~0.6	0.9	2.813	0.795	1.044	3.9	0.110	0.031	0.041
		0.6~0.3	0.45	3.507	1.233	2.150	2.6	0.092	0.032	0.056
total								0.725	0.159	0.175



**Fig. 11** Relationships between the crushing energy input determined by the load-displacement curve and theoretical crushing energies calculated by Eqs. (5)~(7).

(7) から、それぞれ粒子寸法の単位 (mm) を含んで (kg·m/t) (mm)<sup>1/2</sup> および (kg·m/t) (mm) のようになる。

さて、上述のようにして計算された  $E_1, E_2, E_3$  の値は、先に荷重-変位曲線から求めた単位重量当りの破碎入力エネルギー  $E$  に対応する。そこで両者の関係を図示したのが **Fig. 11** である。ただし、 $W$  は各試験における試料重量 (t) である。図から、同一試料、同一試験条件において層厚  $t$  を変化させた場合の両者の関係は、いずれの



**Fig. 12** Crushing conditions and the crushing energy coefficients determined from the relations as shown in Fig. 11.

理論式を用いてもすべて直線関係を示す。このことは、2種類の最大荷重  $P_{max}$ 、3種類の岩石および2種類の試料粒度  $d_f$  のすべてについて成立する。したがって、少なくとも岩石の種類、試料粒度、および最大荷重が等しいとき、破碎係数  $C_1, C_2, C_3$  はそれぞれの直線の勾配として一意的に決定される。

ところで、破碎係数は前節(1)に述べたことから、破碎機構と岩石の種類によって定まる定数であり、試料粒度や産物粒度によって変化しないことが望ましい。そこで、この点を検討するため、**Fig. 11** から決定された  $C_1, C_2, C_3$  の値を各岩種ごとに示したのが **Fig. 12** である。図から、試料粒度によって破碎係数の値が変化しないという条件を満たすものは、層圧縮破碎法においては  $C_1$ 、すなわち Kick の説が最上であると判定される。これに比べると、現在最も広く使用されている Bond の説、 $C_2$ 、や Rittinger の説、 $C_3$ 、は層圧縮破碎法への適用が不満足といわざるを得ない。

次に、同一岩石試料について、最大荷重 40 t と 10 t によって  $C_1$  の値に明らかに差が認められる (この点に

される。なお、この計算において、破碎比 50 以上の産物 ( $d_f=20\sim 10$  mm 試料の場合の  $d_p=0.3$  mm 以下、 $d_f=10\sim 5$  mm 試料の場合の  $d_p=0.15$  mm 以下) についての破碎エネルギーは省略した。また、 $E_1, E_2, E_3$  および  $C_1$  の単位は、単位重量当りの破碎エネルギー (kg·m/t) で表されるが、 $C_2$  と  $C_3$  の単位は、式 (6) と



関しては、 $C_2$ 、 $C_3$  の値も同様である)。このことは同一条件の層圧縮試験においても、荷重の増加とともに破砕の機構が徐々に変化することを示すものと解釈される。つまり、同一破砕比の産物を得るのに必要なエネルギーは  $C_1$  に比例することから、 $C_1$  の小さな破砕条件、この場合最大荷重 10 t の方が効率のよい破砕が期待できるといえる。言い換えると、層圧縮破砕法において、最大荷重を必要以上に増しても有効な破砕が行われず、たとえば、不必要な締め固めや過粉碎等に入力エネルギーの大半が消費されるものと考えられる。このことは、先に破砕入力エネルギーと産物粒度の項で指摘した事実とよく一致している。

以上の結果より、層圧縮破砕方式を採用する場合、与えられた試料粒径  $x_f$  から任意の産物粒径  $x_p$  への破砕エネルギーは、上述のようにして求めた破砕係数  $C_1$  の値と Kick の破砕エネルギー式 (5) を用いて実用上十分の精度で推定できると結論される。なお、破砕係数  $C_1$  は、岩石の種類による破砕特性とクラッシャの破砕機構とによって定まる特性値とされているが、本実験にみる限り、層圧縮破砕法における岩石の種類による差は従来報告されているものに比べてきわめて少ない。もしこれが層圧縮破砕方式における一般的な事実であるとすれば先の整形作用と同様に従来の破砕機構にみられないきわだった特徴であり、今後大いにその応用・発展が期待できる。

## 6. 結 論

従来の碎石プラントにおける細破砕の問題点を根本的に解決するために、ジョークラッシャやコーンクラッシャなどの圧縮破砕機の出口すきまを大きくして流量を増し、そのうえで所期の細粒度産物を得る方法、すなわち層圧縮法を提案した。本報告は静的な層圧縮試験を中心に、圧縮破砕機による能率のよい細破砕の条件と碎石の品質を左右する整形破砕の可能性を論じたものである。

得られた結果の主なものを列挙すれば次のようである。

(1) 層圧縮試験における破砕産物の Zingg 図表ならびに実積率による粒形評価の結果は、いずれも細長いあるいはうすっぺらな石片の少ない、明らかな粒形の塊状化が認められた。すなわち、適当な層厚と最大荷重の選択により、層圧縮破砕方式によって碎石として望ましい整形破砕が行い得る。ここに層厚および最大荷重は、圧縮型クラッシャの出口すきまと圧縮ストロークに対応

する。

(2) 層圧縮試験の荷重-変位曲線から求めた破砕入力エネルギーと破砕産物の各ふるい通過重量とは、いずれの産物粒径についても両対数紙上でほぼ平行な直線となり、適当な層厚と最大荷重（これらによって破砕入力エネルギーが定まる）を用いて、任意の細粒度産物を得ることができる。

(3) 上記直線の勾配  $a$  は、一種の破砕効率を表し、 $a \leq 1$  であることから、1 回の圧縮破砕行程における入力エネルギーを大きくしても、それに比例した産物量の増加は期待できず、むしろ破砕処理量からくる制限の許す限り 1 回当りの入力エネルギーはできるだけ小さく、圧縮回数を多くする方が効率のよい破砕が行える。これは、実機において出口すきまを大きくとり、圧縮ストロークを小さくし、クランク軸あるいはマントル軸の回転数を上げることに対応する。

(4) 小型ジョークラッシャを用いて試験破砕を実施し、上記の静的な層圧縮試験の層厚と最大荷重を、出口すきまと可動ジョーの圧縮ストロークに対応させることにより、層圧縮破砕方式による効率のよい細破砕の可能性を実証した。同時に、破砕入力エネルギー～産物の各ふるい通過重量直線が両者できわめてよく一致し、静的な層圧縮試験による上記検討結果の妥当性を裏づけた。

(5) 最後に、層圧縮破砕方式を実操業に移す場合に、従来の破砕方式におけると同様に、破砕エネルギーの予測が非常に困難なことから、理論エネルギー式の適用性を検討した。その結果、産物の粒度分布から計算される破砕エネルギーと、荷重-変位曲線から求めた破砕入力エネルギーとの対応性において、Kick の式が層圧縮破砕法のエネルギー算定に最適であることがわかった。

本研究の遂行にあたり、実験・計算に多大の御協力をいただいた当時学生、稲角頼保氏（現・(株)森組）を始め、実機による試験破砕の実施の便をお図りいただいた神戸製鋼（株）小浜弘幸氏と村田博之氏の各位に深甚の謝意を表す。なお、本研究の一部は 53 年度科学研究費（試験研究 (1)、代表者岡行俊）の補助による。

### 参 考 文 献

- 1) たとえば、最上武雄編著：土質力学，技報堂，pp. 396～398，1969。
- 2) 村田・田中・岡：コーンクラッシャによる細破砕，破砕・粉碎の新技术に関するシンポジウム予稿集，日本材料学会，pp. 133～148，1978。
- 3) たとえば，Lowrison, G.C.: *Crushing and Grinding*, Butterworths, London, pp. 49～66, 1974。

(1979.4.25・受付)