研究報告

ハードグローブ試験機による石灰石の粉碎性

Grindability of Limestone by the Modified Hardgrove Method

麻生欣次郎*

Kinjiro Aso

森 祐行*

Sukezuki Mori

河本 徳*

Megumu Kawamoto

原 剛*

Tsuyoshi Hara

広田明治**

Akiharu Hirota

1. ま え が き

ハードグローブ試験機を用いて、14鉱山から採取した17種の石灰石の粉碎試験を行なった。ハードグローブ試験機は従来石炭の粉碎試験に用いられていたが、方法の簡便さ、再現性の良好さに着目して、当研究室では石炭以外の非金属鉱物の粉碎試験にも適用している。過去の研究¹⁾において数種の非金属鉱物の粉碎性について実験を行なったが、今回は石灰石に注目し、産地の異なる試料について粉碎試験を行なった。

粉碎性を数値として表現するには多くの問題点があるが、当研究室ではハードグローブ試験機によって粉碎を行なった場合の「粉碎に要した仕事量 (E)」に対する粉碎産物の「粉碎によって生じた比表面積の増加量 (ΔS_v)」の比 ($\Delta S_v/E$) によって粉碎性の比較を行なっている。この数値によると、石灰石の粉碎性は石英、長石、螢石、カオリン、ペントナイトより大きく、滑石より小さい。また17種の試料間にも粉碎性の差があり、微粉になりやすい試料と、なりがたい試料の間には約2倍の差があり、 $8 \sim 18(\text{cm}^2/\text{cm}^3)/(\text{kg} \cdot \text{m})$ の数値が得られた。

2. 実 験

2.1 試 料

山口県美祿、北九州、大分県津久見地区の14鉱山から17種の石灰石を採取した。図1、表2に試料採取地を示す。

試料採取、ならびに粉碎試料の調製は次のように行なった。まず、各鉱山の切羽において発破後の新鮮な石灰石を20cm前後の塊りを中心に、1試料当り30~40kg程度採取した。実験室に持ち帰った塊状試料をハンマーで小

割りし、さらにジョー・クラッシャー(排出口寸法7.5mm)で破碎し、4 meshでフルイ分けを行なった。フルイ上産物は再度ジョー・クラッシャーで破碎する。フルイ下産物を14, 28meshフルイでタイラー・ロータップ・シェーカーによって20分間フルイ分けを行ない、14~28 meshの整粒試料を作成した。

各試料の見掛け比重はベックマン製空比重計で測定した。(表2の「見掛け比重」の項参照)

2.2 試験機および粉碎性測定ならびに計算方法

試験機は小川精機株式会社製ボール・レース型ハードグローブ粉碎機であるが一部分改良し、回転軸に生ずるトルクを測定することにより、粉碎に要した仕事量を求めた。装置の略図を図2に示す。

このほか、測定法として試料重量50 g一定を改めて、

図1 試料採取場所

A: 美祿市 B: 北九州市 C: 大分市
番号は表2の試料番号と同じ

昭和49年9月23日受理

・九州大学工学部採鉱学教室(〒812 福岡市箱崎町)

TEL 092-64-1101

・小野田セメント株式会社

図2 A 粉砕試験装置略図

A : Strain gauge for number of revolution
B : Strain gauge for torque
S : Stabilizer S.M : Strain meter
L.P.F : Low pass filter R.C : Rapicorder
Ⓣ : Torque Ⓝ : Number of revolution

図2 B 粉砕試験機の粉砕部の構造

見掛体積80cc供給することにより、試料容積を一定にして粉砕試験を行なった¹⁾。100ccのメスシリンダーを切断して作った80ccのマス(杓)に一定高さのロートから試料を流し込み、その重量を測定した結果、各試料ごと20回の測定のバラツキは小さく、この方法の誤差が小さいことが証明された。

粉砕による比表面積の増加量はフルイ分け法による粉砕産物の粒度分布(280meshまで)と空気透過法による平均粒径(280mesh以下)とを組み合わせる算出した¹⁾。

粉砕前の試料の平均粒径を d_i とし、粒子を球形と仮定すると、その単位体積当りの比表面積 $S_{vi}(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ は次のようになる。

$$S_{vi} = \frac{\pi d_i^2}{\frac{4}{3} \pi d_i^3} = 6 \times \frac{1}{d_i} \quad \dots\dots(1)$$

粉砕後、 r 段階に粒度を区分した時、第 n 区分の平均粒径を $d_n(\text{cm})$ 、総重量に対する n 区分の重量割合を $W_n(\%)$ とすると、粉砕によって得られた比表面積の増加量 $\Delta S_v(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ (単位体積当り)は次のように表わされる。

$$\Delta S_v = \frac{6}{100} \left(\sum_{n=1}^r \frac{1}{d_n} \cdot W_n - \frac{1}{d_i} \times 100 \right) \quad \dots\dots(2)$$

(2)式に示された $1/d_n$ はJIS標準フルイについて求めると表1に $[1/d]$ として示した数値となる(表1は粉砕試験における ΔS_v の計算の一例を示したものである。)

280mesh以下の粒子はフルイ分けが困難なため、空気

表1 粉砕試験の計算例

区分	粒 径 (Mesh)	(cm)	粒度区分 (Mesh)	区分の平均 粒径 d (cm)	$1/d$	粉砕産物の各 区分重量 (W_n)	n ($W\%$)	$\Sigma W(\%)$	$\frac{6}{100} \times W(\%) \times \frac{1}{d}$
1	14	0.1190	14~28	0.08379	11.93	88.1940	45.08	45.08	32.28
2	28	0.0590	28~36	0.04978	20.09	34.1563	17.46	62.54	21.04
3	36	0.0420	36~48	0.03532	28.31	19.9498	10.197	72.74	17.32
4	48	0.0297	48~70	0.02497	40.04	12.1041	6.187	78.93	14.86
5	70	0.0210	70~100	0.01769	56.53	9.2732	4.740	83.67	16.08
6	100	0.0149	100~145	0.01251	79.95	6.6187	3.383	87.05	16.23
7	145	0.0105	145~200	0.008815	113.45	3.7795	1.932	88.98	13.15
8	200	0.0074	200~280	0.006263	159.68	2.4270	1.241	90.22	11.89
9	280	0.0053	-280	(d_{s-280}) 0.001357	($1/d_{s-280}$) 736.9	19.1277	9.777	100.00	432.31
Total						195.6303	100.00		575.16
Date : 1970. 7. 10						Feed : 196.1092 (g)		(S_{vi})	71.60
Sample : ①戸高津久見 (N=60回)						S_p, G_r : 2.70		(ΔS_v)	503.56

(注) ◎ S_{vi} は粉砕前の試料(14~28Mesh)の比表面積
◎区分の平均粒径 d (cm)は幾可平均径

透過法によって測定した平均粒径(d_{p-280})を以下に述べる方法¹⁾でフルイ目としての平均粒径(d_{s-280})に換算して $1/d_p$ を求めた。空気透過法とフルイ分け法による200~280mesh産物の平均粒径をそれぞれ d_{p+280} , d_{s+280} とし、200~280msshおよび-280meshでの換算係数を k_{+280} , k_{-280} とすると次のように表わされる。

$$d_{s+280}/d_{p+280}=k_{+280} \quad \cdots\cdots(3)$$

$$d_{s-280}/d_{p-280}=k_{-280} \quad \cdots\cdots(4)$$

(3), (4)式から次の式によって d_{p-280} を d_{s-280} に換算できる。

$$d_{s-280}=\frac{k_{-280}}{k_{+280}}\times\frac{d_{s+280}}{d_{p+280}}\times d_{p-280} \quad \cdots\cdots(5)$$

k_{+280} , k_{-280} , の値は試料によって異なっていると思われるが、石英粉について求めた結果によると、 $k_{+280}=2.06$, $k_{-280}=1.24$ となった。試料の如何にかかわらず、この比が同一であると仮定して、次の数値を用いて換算した。

$$k_{-280}/k_{+280}=0.602 \quad \cdots\cdots(6)$$

$$k_{+280}/k_{-280}=1.66 \quad \cdots\cdots(7)$$

$$\frac{1}{d_{s-280}}=1.66\times\frac{d_{p+280}}{d_{s+280}}\times\frac{1}{d_{p-280}} \quad \cdots\cdots(8)$$

3. 結果および考察

粉碎仕事量に対する比表面積の増加量の関係は回転の回数が多くなると次第に粉碎効率が悪くなり、比例関係が成立しなくなる。しかし、過去の研究¹⁾において回転回数 100程度までは比例関係が成立すると考えられるので今回は回転回数60回で各試料の粉碎性を比較した。

3.1 粉碎産物の粒度分布

表1に示す粒度区分で、280meshまではJIS標準フルイ(深さ24mm)を用い、Tayler Ro-Tap Shakerにより15分間フルイ分けを行なって粒度分布を求めた。この場合、200, 280meshのフルイには目詰りを防ぐために粗粒子を入れてフルイ分けを行なった。この結果をRosin-Rammler線図として図3に示す。(図3は線が錯綜しないように代表的な試料について描いている。)

280mesh以下の産物について、空気透過法(島津式

図3 粉碎産物の粒度分布曲線 (Rosin Rammler 線図)

図4 空気透過法による-280mesh産物の平均粒径

Permeasizer)によって求めた平均粒径を図4に示す。(線が錯綜しないように代表的なものを記入)縦軸は空隙率(ϵ)で、 ϵ を変えて測定した結果である。平均粒径は原理的には ϵ に関係なく一定の値を示すはずであるが、図に示すように測定値は ϵ によって変化し、全試料について同じような傾向を示す。したがって、実験の精度、再現性などから考えて、今回は $\epsilon=44.7\%$ における測定値を平均粒径として採用した。200~280mesh産物の平均粒径は形状などの影響によるか図に示すように試料によって異なった値を示している。同じように280mesh以下の産物についてもやはり同一ではなく各試料とも異なった値を示しているが、これは形状の影響の外に粉碎による粒度分布の差による影響が加わっていると考えられる。これらの d_{p+280} , d_{p-280} の値を用いて(5)式によって、

図5 回転軸に生じるトルクの測定結果の一例（標準線は $26 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}$ のトルク）

図6 粉碎時の回転軸にかかるトルク値の変化

d_{p-280} をフルイ目粒径に換算した値を表1および表2に d_{s-280} として示している。また、同じ表に280mesh以下の重量%も示している。

3.2 回転回数と粉碎仕事量の関係

粉碎に要した仕事量を求めるために回転軸にかかるトルクを測定した。図5にその測定例を示す。図は5Hz Cut offのLow pass filterを通したものであり、Low pass filterを通さない場合にはさらに高周波の振動が観測される。図5の振動の高周波の部分を除いて平均的なトルク値の変動状態を示すと図6のようになる。変動の状態は試料によって異なるが、一般的に粉碎開始時に急激なトルク値の上昇があった後、1～2回ではほぼ一定になり、その後、粉碎の進行とともに徐々にトルク値は減少

していく。

粉碎に要した仕事量を求めるには、記録紙からトレース用紙にトレースした後、ハサミで切りとり、その紙の重量を天秤で測定して、面積を求めて仕事量を計算した。別に試料を入れない場合の空転状態でトルクを測定し、この値を差し引いて正味の仕事量とした。

粉碎に要した仕事量はトルク値が常に一定であるならば、回転回数と比例関係がなりたつはずであるが、上述のように回転とともにトルク値が減少の傾向にあるので、わずかずつではあるが、徐々に比例関係から偏倚することとなる。各試料について60回の回転を与えた時の仕事量を求めると、表2に $E(\text{kg} \cdot \text{m})$ として示した数値となり、46～63 $\text{kg} \cdot \text{m}$ の仕事量となっている。実験時における感じとしては「粘り」のある試料では仕事量が高い値を示し、「さらさら」した感じの試料では低い値を示しているようである。

3.3 粉碎による比表面積の増加量

条件を同じくし、60回の回転を与えて粉碎を行なった場合の比表面積の増加量 (ΔS_b) および粉碎に要した仕事量 (E) を表2に示す。粉碎仕事量と比表面積増加量との関係は粉碎初期の段階では一応比例関係にあるとみなして良いようである¹⁾。比例関係の成立する範囲は試料によって異なるものと思われるが、一応60回転までは ΔS_b と E の間に比例関係が成立するとして、単位仕事量当りの比表面積の増加量を求めると表2に $\Delta S_b / E (\text{cm}^2 / \text{cm}^3) / (\text{kg} \cdot \text{m})$ として示した値となる。この $\Delta S_b / E$ の数値をもって石灰石の粉碎性の比較を行なうと図7に示す結果

表2 石灰石試料の粉碎試験結果

試料採取地	番号	見掛比重	嵩比重	-280mesh		比表面積 増加量 ΔS_v	$\Delta S_v/N$	E	$\Delta S_v/E$	
				$d_{s-280}(\mu)$	W(%)					
美称地区	住友セメント・秋芳鉱業所	1	2.70	1.24	13.23	13.58	693.07	11.55	52.657	13.16
	宇部興産・伊佐セメント工場	2	2.71	1.24	12.22	8.21	473.14	7.89	54.697	8.65
	小野田セメント・重安鉱業所	3	2.71	1.23	11.51	11.48	670.27	11.17	55.336	12.11
北九州地区	小野田セメント	4	2.70	1.43	13.47	8.29	432.98	7.22	49.691	8.71
	門司工場(吉田山)	5	2.71	1.40	13.80	10.18	522.82	8.71	54.900	9.52
	〃(遠郷山)	6	2.69	1.28	13.85	12.95	717.65	11.96	47.446	15.13
	宇部興産・苅田セメント工場	7	2.70	1.34	15.55	10.91	509.45	8.49	52.338	9.72
	三菱セメント・東谷工場	8	2.69	1.38	16.16	9.53	435.67	7.26	47.372	9.20
	日本磁力選鉱・吉原鉱業所	9	2.71	1.33	15.03	12.40	607.40	10.12	49.732	12.21
	日本セメント・香春工場	10	2.70	1.31	13.41	14.12	731.98	12.20	58.078	12.60
	麻生セメント・田川工場(船尾)	11	2.70	1.26	14.83	18.80	846.86	14.11	46.345	18.27
津久見地区	小野田セメント・田平ベンチ	12	2.71	1.21	14.10	11.38	561.86	9.36	56.689	9.91
	津久見工場	13	2.72	1.23	13.21	11.89	614.55	10.24	61.075	10.06
	(水晶山)山頂ベンチ	14	2.72	1.24	13.67	11.37	570.95	9.52	59.438	9.61
	日鉄鉱業・津久見鉱業所(胡麻柄山)	15	2.72	1.26	12.99	9.99	527.89	8.80	60.693	8.70
	津久見鉱業・津久見鉱業所(〃)	16	2.72	1.22	14.00	10.29	515.53	8.59	58.042	8.88
	戸高鉱業・〃(〃)	17	2.70	1.23	13.57	9.78	503.51	8.39	63.403	7.94

図7 石灰石試料の粉碎性

となる。

りやすいことを示している。

17種中、11種が $9(\text{cm}^2/\text{cm}^3)/(\text{kg}\cdot\text{m})$ 付近に集中し、4種が12.5付近の値を示し、遠郷山と船尾山の2種の試料が、それぞれ15.1、18.3と大きな数値となり微粉にな

3.4 石灰石と他の鉱石との粉碎性の比較

過去に行なった各種鉱石の粉碎性¹⁾を $\Delta S_v/E(\text{cm}^2/\text{cm}^3)/(\text{kg}\cdot\text{m})$ で表わしたのが表3である。これらの結果と

表3 粉碎性指数 $\Delta S_p/E$ (cm^2/cm^3)($\text{kg}-\text{m}$)

鉱石名	略号	試料採取地または入手先	見掛け比重	S_p/E
滑石	T	長崎県彼杵郡	2.85	21.00
石膏	G	青森県同和鉱業・花岡鉱業所	2.35	8.55
ベントナイト	B-1	福岡県日本ベントナイト(一層)	2.23	8.4
"	B-2	"(三層)	2.28	5.8
カオリン	K-1	岡山県品川白煉瓦(白色)	2.55	5.9
"	K-2	"(灰色)	2.57	5.9
石炭	C-M	福岡県三井鉱山・三池鉱業所	1.250 ~1.275	15.45
螢石	F1	愛知県不二鉱業(輸入品)	3.18	7.0
長石	F-1	佐賀県東松浦郡	2.60	10.0
"	F-2	岡山県品川白煉瓦	2.62	6.3
石英	Q	福岡県糸島郡高祖大門	2.66	3.7

図8 石灰石と各種鉱石の粉碎性の比較

今回の石灰石の粉碎性の比較を行なうと図8に示すようになる。

他の鉱石のデータが少ないので即断はできないが、傾向として、石英、長石、螢石、カオリン、ベントナイト等より微粉になりやすく、滑石よりは微粉になりにくいことが認められ、数値としては石英の2倍～5倍となっている。

4. む す び

粉碎試験においては、粉碎仕事量と比表面積をどのように測定して、どのように表現するかが非常に重要であり、かつ、困難な問題である。今回の実験においても粉碎産物の280mesh以下の平均粒径の求め方によって比表面積の増加量が非常に大きく左右されることや、フルイ分けと空気透過法の併用による粒子径の決定という問題点がある。また粉碎仕事量に関しては、試料の見掛け容積

80ccに対して粉碎に要した仕事量を求めているが、粉碎に際してはたしてエネルギーが試料のどれだけに作用しているかは問題として残っている。

測定法そのものの問題点はさらに研究を進めて、より再現性、精度においてすぐれた方法を確立せねばならないが、現在の段階における測定方法において石灰石の粉碎性を調べると、石英、長石、螢石、カオリン、ベントナイトなどより微粉になりやすく、滑石より微粉になりにくいということが認められる。また石灰石試料の中でも粉碎の難易があり数値として8～18(cm^2/cm^3)($\text{kg}-\text{m}$)を示し、特に微粉になりやすい船尾山(No.11)と微粉になりにくい胡麻柄山(No.17)との間には約2倍の差が現われている。

粉碎の難易と岩石の性質との関連は明確ではないが、実験途中の観察によると微粉になりやすい船尾山(No.11)の試料は粗砕の際の感じでは「堅い」感じを受けるが、

粉碎産物は「サラサラ」した感じを受ける。他方、感じとして「粘り」のある試料では $\Delta S_v/E$ は小さな値となり、微粉になりにくい結果を示している。いわゆる“Hardness”と“Toughness”で表現されている岩石の性質（数値で表現することは困難であるが、）を調べることは今後に残された問題である。

謝 辞

試料の採取にあたっては各鉱業所の方々にいろいろご便宜をはかっていただいた。各鉱業所の皆様に心からお礼申し上げる次第である。

文 献

- 1) 麻生欣次郎, 森祐行, 河本徳, 原剛: 浮選, No.40, P.31~37 (1970)

Summary

Grindability of Limestone by the Modified Hardgrove Method

Kinjiro Aso* Sukeyuki Mori* Megumu Kawamoto* Tsuyoshi Hara* Akiharu Hirota**

Grinding tests of limestone were performed using the Hardgrove's testing machine. Energy consumed (E kg.m) by grinding was obtained by the measurement of torque of the axis of the machine. Specific surface area increased ($\Delta S_v \text{ cm}^2/\text{cm}^3$) by grinding was calculated by the size analysis of the products. Grindability was shown as the ratio of ΔS_v to E .

As a result, the grindability indices of 17 samples of limestone from 14 quarries were ranging 8—18(cm^2/cm^3)/(kg. m). These values of limestone were larger than those of quartz, feldspar, fluorite, kaolin and bentonite, and smaller than that of talc, and two to five times as large as that of quartz.

(* Department of Mining Engineering, Kyusyu University.

**Onoda Cement Co. Ltd.