セメント用諸原料の粉砕仕事指数 と被粉砕性との関係

Correlation between Bond's Work Index
and Grindability of Various Materials for Portland Cement

本 間 栄五郎* 磯 野 直 員* 井 上 敏 雄*
Eigoro Homma Naokazu Isono Toshio Inoue

1. は し が き

Rittinger (1867年) および Kick (1885年) の粉砕法則に対して、1952年に Bond は “一定重量の均質被粉砕物の粉砕において、有効に消費される全仕事量は新たに生成された粒子の直径の平方根に逆比例する”。といういわゆる粉砕の第3法則を提案し (1)式で示される)、またその際仕事指数の概念を導入した¹⁾。

$$W = K \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \dots\dots\dots(1)$$

仕事指数 (W_i) は、物質の粉砕作用に対する抵抗を示す指数であるが、Bond はこれを具体的に “理論的に無限大の粒子を、100 μ を80%通過する迄粉砕するに要する仕事量” と定義して(1)式を(2)式のように仕事指数の関数として示した¹⁾。

$$W = W_i \left(\frac{\sqrt{F} - \sqrt{P}}{\sqrt{F}} \right) \left(\sqrt{\frac{100}{P}} \right) \dots\dots\dots(2)$$

したがって、物質の仕事指数が分れば、その物質を大きさ F から P 迄粉砕するに要する仕事量が分るので、粉砕機的设计あるいは効率判定の基礎数値として使用することができるし、また、この仕事指数が 1 short ton の物質を粉砕するに要する動力 (KWh) という実用単位で示されるので、未だ操業に使われていない原料の被粉砕性の判定のためにも極めて実用的である。

このために、セメント工場で使用する代表的な諸原料

のボールミル粉砕仕事指数を測定し、さらに、これらの原料の被粉砕性を Hardgrove 法および旧 ASTM のボールミル法を一部修正した新ボールミル法によって測定し、それら相互間の関係につき検討したので報告する。

2. ボールミル粉砕仕事指数の測定方法と測定結果

2.1 測定方法

ボールミル粉砕仕事指数の測定方法は、三輪²⁾ が本誌で紹介した方法と概ね同様であるので省略するが、以下の測定で筆者らの行なった点その他につき 2, 3 補足すれば次のようである。

- 1) 給鉱となる -3.36 mm 全通試料はジョークラッシャーにより作成した。
- 2) セメント工業では、88 μ フルイ通過分を製品と考えることが多いので、コントロールフルイとしては目開き 88 μ のフルイを使用した。
- 3) Ro-Tap シェーカーによるフルイ時間は15分間とした。
- 4) 計算式

$$W_i = \frac{44.5}{(P_1)^{0.23} \times (G_{dp})^{0.82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)} \dots\dots(3)$$

W_i : 仕事指数 [KWh/short ton]

P_1 : コントロールフルイの目開き [μ …本報では88 μ]

G_{dp} : 循環量が250%で安定したときのミル1回転当りの製品出来高 [g/rev.]

P : 製品の80%通過粒径 [μ]

F : 給鉱の80%通過粒径 [μ]

* 日本セメント(株)研究所 (東京都江東区深川清澄町1-8)
TEL. 03-642-7171

ただし、(3)式による仕事指数は、Bond
らが前述の試験用ボールミルと試験方法に
よって過去40年間にわたって広範囲にわた
る物質について行なった試験結果と現場操
業ミルとの比較によって得られたもので、
この式によって得られた仕事指数は“オー
バーフロータイプ”の湿式閉回路、ミル内
径8ftの平均的な効率のモーター出力に対
応するもの”とされており³⁾、粉碎方式(乾
式粉碎、開閉回路の別など)、ミル直径な
どがこれと異なるものに対してはそれぞれの
条件につき(3)式によって得られた仕事指
数の補正係数が用意されている^{3,4)}。

また、(3)式による W_i は short ton(907.2
Kg) 当りの KWh であるので、metric ton
当りに換算するには 1.10 倍する必要がある。
ただし、本報では仕事指数は何れも(3)
式によるものをそのまま用いている。

2.2 測定結果

前項で述べた試験方法にしたがって、セ
メント工場で使用する代表的な諸原料の仕
事指数を測定した結果は表1の(5)欄に示す
通りである。表1には参考としてこれらの
原料に対応する原料につき Bond が文献⁴⁾
に示している仕事指数を欄外に示した。

表1の原料は何れも産地が異なり、また
セメントクリンカの場合は製造工場が異な
るものであるが、これらの測定結果によれ
ば、セメント工場で使用する諸原料の仕
事指数は天然石こうの 6.4 KWh/short ton
と石灰の 25.6 KWh/short ton の範囲内に
あり、これを種類別に見ると石灰石、けい
石などは、同じ原料であってもその産地、
銘柄が異なれば仕事指数は著るしく異なる
し、また、セメントクリンカについても品
種は同じであっても、その製造条件の相違
によって著るしく異なる仕事指数を示すこ
とが分る。

なお、表1中の試料 No.2 は当研究会の
粉碎能グループ会の標準粗粒石灰石(広島
県日東粉化工業KK)についての測定結果
である。

表1に示した仕事指数は極く限られた1
例にすぎないが、これらの結果から問題の
対象となる原料についてはその都度実測す

表1 セメント用諸原料の仕事指数と被粉碎性測定結果

(1) 試料No.	(2) 試料名	(3) 比 重	(4) Bond 法		(6) Hard- grove 法	(7) 給 鉄 の 全 重 量 (g)	(8) 給鉄中の +88 μ の 量 (g)	(9) 粉 碎 速 度 常 数		(10) “ 新 ボ ー ル ミ ル 法 ”		(11) 被粉砕性 指数 (G)	備 考	参 考	
			G _{bp} (g/rev)	(Wi)				(H)	(ro)	(m)					
1	天然石こう	2.32	3.36	6.4	121.2	— ¹⁾	—	—	—	—	—	5	8.16	モロソコ産高純度 精工研粉砕グループ協会標準粒石灰石	Bond の測定値 ²⁾ 試験回数 平均 Wi (セメント用) 62 10.18 (一般) 119 11.61
2	No.1	2.71	2.88	10.0	80.9	1107	1028	1609	0.951	0.951	63.89	16	12.18		
3	No.2	2.75	2.91	6.7	107.2	1260	921	1178	0.869	0.869	78.18				
4	No.3	2.74	2.44	7.7	102.6	1241	911	1317	0.793	0.793	69.17				
5	No.4	2.69	1.64	11.1	61.9	1177	993	2365	0.843	0.843	41.99				
6	No.1	2.66	1.70	10.5	87.8	1207	974	1505	0.981	0.981	64.65	—	—		
7	No.2	2.68	1.38	12.6	71.2	1086	905	1689	0.923	0.923	53.58				
8	No.3	2.66	1.00	16.3	60.4	1024	789	2058	0.925	0.925	38.34				
9	No.4	2.66	1.00	16.4	39.3	1125	984	3143	0.962	0.962	31.31				
10	粘土類	2.81	1.14	14.7	58.7	1218	970	2243	0.897	0.897	43.25	—	—		
11	No.2	2.71	0.73	21.2	37.2	1199	989	3763	0.914	0.914	26.28				
12	普通 No.1	3.19	1.30	13.5	60.8	1247	949	2367	0.791	0.791	40.09			低SiO ₂ 高SiO ₂	
13	普通 No.2	3.18	0.77	19.2	38.6	1236	1049	3565	0.965	0.965	29.42				
14	早強 No.1	3.16	1.51	11.5	68.2	1194	911	2032	0.839	0.839	44.83	60	13.49		
15	早強 No.2	3.17	0.98	16.4	45.3	1204	998	2926	1.051	1.051	34.11				
16	中熟クリンカ	3.19	1.27	13.4	66.9	1227	962	2313	0.775	0.775	41.59			12	15.76
17	スラック	3.00	1.17	14.9	49.5	1162	951	2903	0.794	0.794	32.76				
18	石灰	1.63	0.51	25.6	41.1	500	459	1788	0.967	0.967	25.84	10	11.37		

注. 1) コーチングのため測定不能, 2) 文献(4)による。

図1 仕事指数 (W_i) と粉砕指数 (H) との関係

ことが望まれる次第である。

しかしながら、この仕事指数の測定には上述のように特定のミルを必要とする上、さらに煩雑な操作を繰り返すために時間と人手とを要し、操業中の工場においてそれぞれの必要に応じて簡易に測定するという事は難しい。このために表1の原料につき以下に述べるような被粉砕性試験を行なってそれら相互間の関係につき検討した。

3. 仕事指数と被粉砕性との関係

3.1 仕事指数と Hardgrove 法による粉砕指数との関係

元来、Hardgrove 法は石炭の被粉砕性試験方法の1つとして ASTM で規格⁵⁾となっているものであるが、この装置は現在では石炭に限らず一般の物質の被粉砕性試験としても広く用いられているようである。

この装置並びに試験方法については既に神保⁶⁾あるいは中条^{7,8)}が詳細に紹介しているのでここでは紙数の都合上省略する。

ASTM の規格にしたがって表1の諸原料の粉砕指数 (H) (被粉砕性の難易を示す相対値で、この指数の大きいほど被粉砕性の良いことを示す) を測定した結果は表1(6)欄の通りで、仕事指数 (W_i) との間に良い相関があることが認められるが、これを図示すれば図1の通りである。

これら両者間の関係を最小自乗法によって求めた結果は(4)式の通りで、図1中に実線で示した。

$$W_i = \frac{742}{(H)^{0.98}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

また図1中の点線は、Bond がこれら両者間の関係につき示した(5)式を示したものである³⁾。

$$W_i = \frac{435}{(H)^{0.91}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

図1において(4)式と(5)式を比較すると、Bond が示した(5)式から求めた W_i の方が(4)式から求めた W_i より小さくなることを示している。この差が生じた1つの原因は、(3)式中のコントロールフリの目開き (P_1) の違いにあると思われるが詳細は不明である。

3.2 仕事指数と新ボールミル法による被粉砕性指数との関係

ASTM では石炭の被粉砕性試験方法として、1937年に前項で述べた Hardgrove 法⁵⁾とボールミル法⁹⁾とを暫定規格として制定し、1951年に前者を本規格とし後者を廃止したが、このボールミル法で使用するようになってミルは構造が簡易で取り扱い易く、かつ製作費も安価であるので広く用いることができるものと思われる。

筆者らはこのミルを用い旧 ASTM ボールミル法の規格の一部を修正して表1の諸原料の被粉砕性を測定したので、以下にその試験方法の概要と試験結果および仕事指数あるいは粉砕指数との関係につき述べる。

1) 旧 ASTM ボールミル法の要点

この方法で用いるボールミルは、内矩長さ8", 内径8¹/₈" の円筒鉄製で、内壁に7/16" 角、長さ8" の鉄製リフター3個が120°の間隔でとりつけられている。用いる媒体は直径1" のボールベアリング100個でミル回転速度は40 rpm である。

被粉砕物(石炭)の給鉱粒度は $-1,680\mu + 74\mu$ で、この試料500gを粉砕してその80%すなわち400gが74 μ フリを通過する迄の回転数を求めるわけであるが、その求め方は、先づ最初に給鉱量500gの10%すなわち50gが74 μ を通過するに要する回転数を求め、これを1サイクルとして以後この回転数毎にミルを止めて74 μ フリでふるい、フリ通過分を捨てて残分のみをミルに戻し、このような粉砕フリ別けを繰り返して給鉱量の80%が通過する延回転数を求め、(6)式によってボールミル粉砕指数を算出する。

$$\text{ボールミル粉砕指数} = \frac{50,000}{74\mu \text{ フリを } 80\% \text{ 通過する迄の延回転数}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

2) 新ボールミル法

図 2 粉碎速度の1例 (R-R 線図)

注) ○内の数字は表1の試料No.を示す

旧 ASTM ボールミル法の要点は上述の通りであるが、この試験方法はもともと石炭に対するものであるしまた非常に時間のかかる試験方法であるのでこの方法をそのまま一般の物質の被粉碎性試験方法とするのは適当でない。このために次の諸点を修正して一般物質にも使用できる被粉碎性試験方法とし、仮りに“新ボールミル法”と名付け、この試験方法で得られる被粉碎性を示す数値を“被粉碎性指数 (G)”と称することとした。修正した主な点を記すれば次の通りである。

i) 被粉碎物の給鉱粒度は、旧ASTMでは $-1,680 \mu + 74 \mu$ を使用することになっているが、新ボールミル法では $-1,680 \mu +$ (製品粒度の上限)、すなわち(3)式中のコントロールフルイ (P_1) でカットしたものを給鉱試料とする。ただし、以下に報告する表1の諸原料についての実験では、試料の量的関係からやむを得ず $1,680 \mu$ 全通試料を使用した。

ii) 旧 ASTM では 500 g の石炭を使用することになっているが、比重が著しく異なる物質の被粉碎性を同一条件で測定するためには容積基準で試料量を決めた方が合理的である。このために $-1,680 \mu + 74 \mu$ の石炭 500 g が占める充填容積を測定したところ 600 cc であったので新ボールミル法では試料の種類に関係なく充填容積で 600 cc とした。表1の諸原料の 600 cc 当りの重量は表1(7)欄に、またこの中に含まれる $+88 \mu$ の量は(8)欄に示す通りである。

iii) 旧 ASTM では粉碎サイクル毎に 74μ フルイ通過分を取り除いて行くので各サイクル毎に試料量と媒体量の比率は小さくなって行き、また粉碎の後期には被粉

図 3 仕事指数 (W_i) と被粉碎性指数 (G) との関係

砕性の悪いもののみが残って行くことになる。したがって、粉碎の初期の残分の変化してゆく傾向から試料量の 80% が 74μ フルイを通過するときの回転数を予測することは極めて難しい。

iv) このために粉碎方法を次のように改めた。

予め定めた粉碎時間毎に(表1記載の18種類の原料に対して粉碎時間を $15, 30, 45, 60$ および 75 分間としたが、以下に述べるように粉碎時間とフルイ残分の変化との間には一定の法則性があるので最低3つの異なる粉碎時間につきフルイ残分を求めれば良い。また、上記の粉碎時間も長すぎるので現在では $5, 10$ および 20 分間とし参考として 40 分間の粉碎を行なっている。) 600 cc 宛の試料を用意し、所定の粉碎を終えた試料を所定のフルイでふるい別けると、粉碎が正常に行なわれている場合には給鉱中のフルイ残分の粉碎時間に対して減少して行く状態は、(7)式のように粒径分布に対する Rosin-Rammler の法測と全く同様の法測に従かう^{10~13)}。

$$R = R_0 \exp(-t/t_0)^m = R_0 \exp(-r/r_0)^m \dots \dots \dots (7)$$

R : t 分間粉碎後における所定のフルイ残分 [%]
(本報の場合 88μ フルイ使用)

R_0 : 給鉱中の 88μ フルイ残分 [%]

m, t_0 : 粉碎条件と物質の性質によって決まる常数で、 t_0 は $R/R_0 = 36.8\%$ となるときの粉碎時間 [分]

r, r_0 : 粉碎時間 t, t_0 分に対応するミル回転数 [40 rpm $\times t$ または t_0]

図2は表1中の原料数種につきミル回転数に対して88

図 4 粉砕指数 (H) と被粉砕性指数 (G) との関係

μ フルイ残分が(7)式にしたがって変化してゆく様子を R-R 線図で示したものである。図中石灰石は粉砕時間45分(ミル回転数 1,800)頃から以後は直線から外れてくるが、これはコーティングのために正常な粉砕がさまたげられたものである。

v) 上記の試験から物質の被粉砕性指数(G)を次の(8)式から求める。

$$\text{被粉砕性指数 (G)} = \frac{\text{給鉱中の } 88 \mu \text{ フルイ残分 (g)}}{\text{(7)式中の } r_0} \times 100 \dots (8)$$

3) 仕事指数との関係

前項で述べたように新ボールミル法では(7)式中の常数 r_0 を求める必要があるが、これは図2のように R-R 線図に図示することにより図から読みとることができる。ただし表1中(9)および(10)欄の r_0 および m は計算により求めたものである。この r_0 を用い(8)式にしたがって被

粉砕性指数を求めた結果が(11)欄で、(5)欄の仕事指数との関係は図3に見る通りで、最小自乗法によって求めたこれら両者間の関係は(9)式の通りである。

$$W_i \frac{541}{(G)^{0.99}} = \frac{540}{(G)} \dots \dots \dots (9)$$

また、この被粉砕性指数と Hardgrove 法による粉砕指数との関係は、(4)式と(9)式とから(10)式のように求まり両者の関係は図4に示す通りである。この場合にも、これら両者間には極めて良い相関関係があることが認められる。

$$H = 1.38 (G)^{1.01} \approx 1.4 \times (G) \dots \dots \dots (10)$$

4. む す び

以上のように、セメント工業で用いる代表的な諸原料を用いて Bond のボールミル粉砕仕事指数と被粉砕性との関係を実験的に検討した結果、概ね次のような結論を得た。

1) Bond の仕事指数は、Hardgrove 法による粉砕指数あるいは旧 ASTM の石炭の被粉砕性測定用のボールミルを用いて求めた被粉砕性指数と良い相関関係がある。したがって、これらの被粉砕性を示す指数から仕事指数を推定することができる見通しを得た。

2) 図1, 3 および4によれば、これら相互間には多少のバラツキは見られるが、被粉砕物の性質の変動を考慮に入ればこの程度のバラツキは許容できると考えられるし、また操業中の工場では、1個の試料の被粉砕性を時間をかけて正確に求めるより試験個数を増やして平均的な被粉砕性を把握することの方が重要であると考えられる。

引 用 文 献

- 1) Bond, F.C.: *Trans. AIME*, **193**, 484 (1952)
- 2) 三輪茂雄: 粉体工学研究会誌, **4**, No.2 66 (1967)
- 3) Bond, F.C.: *Brit. Chem. Engrg.*, **6**, 378 (1961)
- 4) Bond, F.C.: *Brit. Chem. Engrg.*, **6**, 543 (1961)
- 5) ASTM Designation: D409-51
- 6) 神保元二: 詳論化学工学単位操作 I (森 芳郎, 吉田文武編), 82 (1962) 朝倉書店
- 7) 中条金兵衛, 永高貞治: 第12回セメント製造交流懇談会報告, 24 (1956)
- 8) 中条金兵衛, 永高貞治: 第17回セメント製造交流懇談会報告, 42 (1960)
- 9) ASTM Designation: D408-37T (1951年廃止)
- 10) 中条金兵衛: 窯業協会誌, **48**, 156 (1940)
- 11) Andreyev. *et al*, 三輪茂雄訳: 粉砕速度の基本式, 粉工研資料, 文献紹介 No.131 (1961)
- 12) Andreyev. *et al*, 三輪茂雄訳: 粉砕速度の基本式の実験的証明, 粉工研資料, 文献紹介, No.132 (1961)
- 13) 三輪茂雄: 粉体工学研究会誌, **2**, No.2 4 (1965)