研究報告

セメント工業用オンライン粒度測定装置の試作

Development of On-line Fineness Meter

川村 洋二*
Youji Kawamura

麻生 平*
Taira Aso

沼田 孝**
Takashi Numata

1. ま え が き

セメント製造工程は焼成工程と粉砕工程に大別できる。製造コストに占める両工程に使用されるエネルギーコストの割合は高く、このためコスト節減努力は主として両工程における省エネルギーに的が絞られている。粉砕工程では粉砕機効率が最大となるように各操作条件が調整されている。粉砕産物であるセメントの粉末度については、粗すぎると水と反応後の強さが不十分になり、細かすぎると粉砕エネルギーを余分に必要とするので、両方の条件から粉末度が最適値に管理されている。オンラインの粒度測定装置はいくつか報告されているが¹⁻⁶⁾、特に乾式粉砕用で耐久性、価格、精度の点で満足なものはないので、オンライン測定、およびこの測定値による粉末度自動制御は一般化しておらず、オフラインで管理している現状である。耐久性、価格、精度を念頭において、粉末度自動制御のためのオンライン粒度測定装置を試作したので、ここに報告する。

2. 原 理

2.1 セメントの粉末度

セメント強さと相関の強い粉末度の表示には比表面積（ブレン法）と粒度分布（風ふるい法）がある。Table 1 に代表的なセメントの粉末度を示す。測定が容易であることから、比表面積法が、セメント粉末度の日常品質管理にオフラインで用いられている。しかし下記の理由で、粒度分布（ふるい残分値）を測定する方法をオンライン粒度測定装置に採用した。

① セメント強さと粉末度の関係においては、硬化初期（＜3日）の強さは 15μ 以下の微粉の量と相関が強いが、長期の強さには $15\sim 40\mu$ の粒子量が有効であるとい

Table 1 代表的セメントの粉末度

ブレン法 比表面積 (cm^2/g)	風ふるい残分 (%)				網ふるい 残分 (%)
	15μ	20μ	30μ	40μ	88μ
3200	66.2	56.9	41.5	29.8	1.2

われている⁷⁾。比表面積は微粉量との相関が強いが、中間粒子($15\sim 40\mu$)の割合を知るにはふるい残分の方が良い。

② 実験室的には比表面積測定が容易であるが、オンライン化する場合は必ずしも実験室と同様ではなく、比表面積法が容易とはいえない。

2.2 装 置

試料は入粉用のベルトコンベア（以下では BC_f とする。）を経て本装置のために新しく設計した空気式分級機に入る。分級後の細粉は空気とともに排風機により排出される。粗粉は粗粉用ベルトコンベア（以下では BC_r とする。）に排出される。粗粉の量は分級風量操作による分級径変更で調整でき、分級風量は排風機回転数で調整できる。排風機回転数は BC_f と BC_r 上の粉体重量が等しくなるように、天秤、変位測定機などを含む制御系によりコントロールされているので、常に一定量の粗粉が得られる。

いまたとえば両 BC の速度を、 BC_r 上の滞留時間が BC_f 上の滞留時間の2倍になるように設定しておくと、入粉量の50%の粗粉量が得られるように分級したとき、両 BC 上の粉体量は等しくなる。分級機に分級径は排風機、天秤などを含む制御系により両 BC の重量が等しくなるように調整されているので、分級機に分級径は試料の50%通過径に相当する。

分級機構造については後述するが、分級径は分級風量（実際的には分級機内の静圧）により知ることができる。この静圧をセメント粉末度信号として、記録、制御に用いることができる。

すでに報告されているオンライン測定装置でも本装置

昭和52年1月29日受理

* 小野田セメント(株)中央研究所 (〒135 東京都江東区豊洲1-1-7) TEL 03-531-4111

** 小野田セメント(株)大船渡工場 (〒022 大船渡市赤崎町跡浜)
TEL 01922-6-2111

Fig. 1 オンライン粒度測定装置の原理

同様に分級機を用いているものがあるが、流量測定機を2台使用して2つの流量(入粉、細粉、粗粉のうちの2つ)を直接測定して比較、演算する場合^{2,4)}が多い。天秤を用いて2つの流量を比較すると流量測定機が省略でき、低価格化できる。この原理に基づいた装置も報告されているが³⁾、その場合は分級径一定で天秤の傾き(2つの流量の差)を粉末度信号として取出している。その装置では流量差を取出しているの、正確な定量供給装置を必要とするが、本装置では、流量差を分級径にフィードバックしているので供給機の定量性は前者ほど要求されない利点がある。

3. 分級機の構造と機能

3.1 構造

分級機の構造を Fig. 2 に示す。BC_fからの試料は電磁フィーダで分級機内に供給される。試料とともに機内に吸引される1次空気により分散されて、ロータ周辺の分級部に入る。分級部ではロータ(羽根付回転円板)の回転による遠心力と中心に向かう気流により分級される。分級された細粉は気流とともに排風機により機外に排出され集じん機に至る。粗粉は分割*を小さくするために分級機下部から吸引される3次空気により再分級され、スクリウコンベアを通して排出される。1, 2, 3次空気はすべて分級部に入り、分級用空気として働く。

3.4 の項で述べるが、この3次空気の導入により β (粗

Fig. 2 分級機の構造

粉側への分割)を小さくしていることがこの分級機の大きな特徴である。

3.2 分級径の調整

この分級機は目的上、試料粉末度が変わった場合でも、分級径を変えることにより、常に一定割合の粗粉を排出するような構造になっていなければならない。分級径はロータの回転数(以下 $N_{sep.}$ とする。)と分級風量(以下 $Q_{sep.}$ とする。)によって調整できる。本装置においては、回転数は試料粒度によりあらかじめ決めておいて、その後の粒度変化は $Q_{sep.}$ (実際は排風機回転数による。)で、粗粉排出割合一定になるように追従する。 $Q_{sep.}$ は分級機内圧力(3次空気入口付近の静圧 P_3)で代表している。よって粒度変化は P_3 の変化として表わされる。

P_3 を一定として $N_{sep.}$ で試料粉末度を表示することも可能であるが、次の理由で $N_{sep.}$ 一定とした方が制御系を一つ省略できるので、 $N_{sep.}$ 一定で P_3 を粉末度信号とした。

① P_3 を一定にするには空気系内へのセメント付着などによる外乱を防ぐために制御系を必要とする。 P_3 で制御している本機の場合は、そのような外乱は両 BC の重量差に現われるので、その段階で消すことができる。

② $N_{sep.}$ への外乱については、影響の少ない分級機用モータを選択することにより、 $N_{sep.}$ 制御系を省略することができる。

* 分割: 入粉のうち一部が全く分級を受けなくて粗粉あるいは細粉に混入する現象をい詳しくは文献(8), 9)を参照されたい。

Fig. 3 $N_{sep.}$, P_3 の d_e への影響

$N_{sep.}$, P_3 の分級径への影響をみるために、一定粉末度のセメント試料を供給して、種々の $N_{sep.}$, P_3 において分級径を測定した。このとき排風機回転数制御は両 BC の重量が一定になるような制御系でなく、各水準内で P_3 が一定になるような制御系に変更してテストした。分級径としては、平衡粒度 (d_e)* を採用し、試料の粒度分布と粗粉回収率 (R/F) より求めた。

結果を Fig. 3 に示す。図の実線は(1)式を仮定し最小二乗法であてはめた直線である。ここでは $a=1.213$, $b=0.610$, $k=7.66 \times 10^4$ であった。(差圧) $\propto$ (風量)² とすると $b'=1.220$ となる。

$$d_e = k \cdot (N_{sep.})^a \cdot (-P_3)^b \quad \dots\dots(1)$$

$$d_e = k' \cdot (N_{sep.})^a \cdot (Q_{sep.})^{b'} \quad \dots\dots(1')$$

3.3 分級状況

分級状況を Fig. 4 に示す。粒度測定には西独アルピネ社製のエアージェットシーブを用いた。このため粒径の定義が異なるので Table 1 の風ふるいによるものとは値が異なる。

3.4 粗粉側への分割率と細粉側への分割率^{8,9)}

Fig. 4 からみて、 α (細粉側への分割率) と β (粗粉側への分割率) をそれぞれ $>63\mu$, $<14\mu$ の部分回収率で表わすことにした。こうして求めた α と β については Fig. 5 の関係がある。この図は $R/F=0.224$ になる

(a) 分級機の部分回収率曲線

(b) 分級前後の粒度分布
Fig. 4 分級機分級状況

* 平衡粒度：分級の結果その粒度を境として、その粒度より大きな粒子が細粉に迷いこんだ量と、その粒度より小さな粒子が粗粉に迷いこんだ量が等しくなる点である¹⁰⁾。

ような種々の $N_{sep.}$ と P_3 の組合せにおける部分回収率曲線から求めたものであり、(2)式で近似される。

Fig. 5 α vs. β

$$\alpha = 10 \cdot \beta^{-0.4} \quad \dots\dots(2)$$

粒度測定装置に組込む分級機としては、 α と β ともに小さいことが理想的であるが、現実的には Fig. 5 の関係があるので、粒度測定誤差を最小にする α と β の組を選ぶ必要がある。 α と β の最適化は次のようにして行なう。

いま入粉量に対し、分割により誤分級された割合 W を(3)式で定義する。

$$W = R_{63} \cdot \frac{\alpha}{100} + (100 - R_{14}) \cdot \frac{\beta}{100} \quad \dots\dots(3)$$

$R_{14}, R_{63} : 14, 63 \mu$ 残分(%)

(2), (3)式および $dW/d\beta = 0$ 、一般的なセメントの粒度として $R_{14} = 55(\%)$, $R_{63} = 5(\%)$ より

$\alpha = 12(\%)$, $\beta = 0.6(\%)$ を得る。

分級機は上の α と β の組合せを与える条件($N_{sep.}, P_3$)のとき、 β の変動に対して粗粉排出割合の変動が最小になる。

3.5 入粉供給流量と粗粉回収率

分級機は一般にふるい式、空気式を問わず、他の条件を一定に保っても、入粉供給流量(F)を変えると分級径、粗粉回収率が変わる。本機においても Fig. 6 に示す関係になる。あてはめた直線は原点を通らないので、同一粒度の試料でも F が変わると R/F が変わり、測定機構上好ましくない。この点については次のようにして補償している。

Fig. 6 R vs. F

$$\text{Fig. 6 の近似式} \quad R = a \cdot F - b \quad \dots\dots(4)$$

BC_f, BC_r 上の入粉、粗粉量をそれぞれ W_f, W_r とすると

$$W_f = F \cdot T_f \quad \dots\dots(5)$$

$$W_r = R \cdot T_r \quad \dots\dots(5')$$

ここで T_f, T_r は BC_f, BC_r 上の粉体滞留時間である。

(4), (5), (5')式より

$$W_f - W_r = F \cdot T_f - (a \cdot F - b) \cdot T_r \quad \dots\dots(6)$$

したがって $T_f = a \cdot T_r$ のように設定し、 $b \cdot T_r$ に相当するおもりをあらかじめ BC_r に加えておけば、(6)式の右辺は常に0になるので、 F の変動による R/F 変動は補償できる。

4. 測定装置の性能

4.1 精 度

現場ミル付設の分級機の操作条件の調整により、製造中のセメントの粒度を変えて本装置に送入して行なった5日間の連続測定の結果を Fig. 7 に示す。ここでは試料粒度を 26μ フライ残分(R_{26})で代表させた。 P_3 と R_{26} の係数に直線をあてはめ、 P_3 から R_{26} を推定する場合の誤差は標準偏差 $\sigma = 0.67\%$ であった。この値はブレン比表面積に換算すると $34 \text{ cm}^2/\text{g}$ に相当する。この σ は R_{26} の実験室での測定のバラツキ $\sigma = 0.3$ を含んでいるので、この測定機自体は $\sigma = 0.60^* (30 \text{ cm}^2/\text{g})$ 程度である。

4.2 応 答

現場ミル付設の分級機の回転数(N_{cs})を変更した場合

* $\sigma = \sqrt{0.67^2 - 0.3^2} = 0.60$

Fig. 7 R_{26} vs. P_3

Fig. 8 指示のインデシャル応答

この測定装置の指示の応答例を Fig. 8 に示す。この図から、応答を1次遅れ系で近似した場合の時定数は15分程度であることがわかる。

この15分という値は測定機本体のみでなく、数分程度と思われる分級機、輸送機などの時定数も含む。実験室における測定テストやモデル作成によるシミュレーションからは10分程度の値を得ているので、この程度の値が、測定機本体の時定数と思われる。

4.3 外乱

4.3.1 温度

分級特性に影響をおよぼすという点で、粉体温度と気温の変化は外乱と考えられる。効果的にこれらの温度を変更する手段がないのでテストはしていないが、Fig. 7 は連続5日間のデータに基づいているので、この間の両温度の変化を含んでおり、4.1 に示した精度はこれを含んだ値である。季節規模の温度変化では外乱が無視しえなくなることも十分考えられるが、この場合は月に一度程度の R_{26} vs. P_3 の関係式の校正を行えば良い。

4.3.2 粒度分布

現場閉回路粉砕系の循環比を変えると比表面積一定で

も粒度分布の異なるセメントが得られる。このように粒度分布が変化したときは R_{26} と数 μ 以下の微粉の量の関係が変わるので、この粒度分布変化も外乱となり得ると考えられる。同一比表面積で R_{26} が2%程度変化した範囲では、測定機指示値と R_{26} の関係 (Fig. 7) に変化は観察されなかった。

5. 粉砕工程の粒度管理への応用

5.1 応用例

オンライン測定を行ない、粒度信号を工程管理室に指示させて、オープンループで粒度管理を行なうこともできるが、Fig. 9 に示すように粒度信号を現場ミル付設の分級機の操作条件にフィードバックすることにより、一定粒度の製品を得るように応用することもできる。

5.2 測定精度について

精度を標準偏差で表わすと、前述のように R_{26} の $\sigma = 0.6\%$ 程度であった。この精度は現在の粒度管理*からみて、セメント粉砕工程に十分応用可能である。

5.3 応答速度について

時定数10分ということは、一般的な測定機としては長すぎるとも考えられる。しかしセメント粉砕工程の時定数、外乱のひん度、粒度管理の現状**からみて、粒度管理用に指示計として、または Fig. 9 のように制御系を組むときの検出機とする場合は實際上大きな問題はない。

次のような応用例では問題になることも考えられる。

- ① 測定装置一台で複数の工程を管理するとき
- ② セメント粉砕工程以外の分野で時定数が短かく、外乱のひん度の多い工程に応用するとき。

6. あとがき

分級法にもとづいたオンライン粒度測定装置を試作し、現場への応用テストを行なった。セメント粉砕工程

Fig. 9 粉砕工程への応用例

* 粒度管理の現状：セメントの強さは種々の因子で変るが、粒度の変動に関する許容範囲は $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度であり、これは R_{26} で3% (ブレンで $150\text{cm}^2/\text{g}$) 程度に相当する。実際の粉末度管理においてはブレン法を用い、 $100\text{cm}^2/\text{g}$ (R_{26} で2%) 程度の差が発生したとき分級機の操作条件の変更を行なっている。

** 現在オフラインで粒度を管理しているが、粒度測定のひん度は1日数回程度である。

の粒度管理用には、少なくとも精度、応答の点において
応用可能であることが判明した。

本装置の耐久性については長期間テストを実施中であ

る。今後もデータ集積を重ねて、セメント粉体にとどま
らず、乾式粉碎および分級工程一般に対する適用を念頭
において開発を進めたいと考えている。

記 号		記 号	
d_e	: 平衡粒度 [μ]	R_{63}	: 63μ フルイ残分 [%]
F	: 時間当り入粉供給量 [kg/h]	T_f	: BC_f 上への粉体の滞留時間 [h]
N_{cs}	: 現場分級機回転速度 [rpm]	T_r	: BC_r 上への粉体の滞留時間 [h]
$N_{sep.}$	: ロータ回転速度 [rpm]	W	: 分割により誤分級された割合 [%]
P_3	: 3次空気入口付近(分級機内) 静圧 [mmAq]	W_f	: BC_f 上への粉体の滞留量 [kg]
$Q_{sep.}$	: 分級機通過空気流量 [m ³ /min]	W_r	: BC_r 上への粉体の滞留量 [kg]
R	: 時間当り粗粉排出量 [kg/h]	α	: 細粉側への分割率 [%]
R_{14}	: 14μ フルイ残分 [%]	β	: 粗粉側への分割率 [%]
R_{26}	: 26μ フルイ残分 [%]	σ	: 標準偏差 (測定機の精度)

引 用 文 献

- Hasler, M.: *Zement-Kalk-Gips*, (3), 132 (1972)
- Supp, A., Auerbach, H.: *ibid*, (3), 134 (1972)
- Heinemann, O.: *ibid*, (3), 137 (1972)
- 田中, 中島: 粉体と工業, (6), 50 (1970)
- Porter, E.S., Warshawsky, J.: *IEEE Transaction on Industry and General application*, IGA-5, (6), 773 (1969)
- Kaiser, F.: *Zement-kalk-Gips*, (2), 92 (1973)
- 森, 河野: セメント技術年報, 10, 156 (1956)
- 今泉: 選炭, 12, (57), 40 (1961)
- 小沼: 粉体工学研究会誌, 11, (1), 7 (1974)
- 日本セメント技術協会 “粉碎委員会報告 S-4” p. 139 (1963)

Authors' Abstract

Development of On-line Fineness Meter

by

Youji KAWAMURA*, Taira ASO*, Takashi NUMATA**

(* Central Research Laboratory, Onoda Cement Co. Ltd., Tokyo)
(** Ohfunato plant, Onoda Cement Co. Ltd., Iwate)

The on-line fineness meter is indispensable to design fully automatic cement grinding system and to save energy in the system. Several on-line fineness meters have been reported, but their prices, as well as durability and accuracy made their users hesitate to apply them. Bearing these points in mind, the authors have developed a new on-line fineness meter. It consists of a pilot air classifier, a balance with two belt conveyors functioning as the scale pan. These conveyors transport powder streams, i.e. classifier feed and coarse particles after classification. Through controlling of the classifier cut-size, the ratio of flow rate of these two streams is kept constant automatically. As the result, the fineness of the sample can be indicated by the cut-point. From the test on a grinding system, following have been obtained:

(1) accuracy

the standard deviation of measured residue on 26μ : 0.6%

(This corresponds to Blain specific surface area 30 cm²/g)

(2) indicial response

the time constant : about 10 min.

List of Figures and Table

Fig. 1 Schematic arrangement of on-line fineness meter

Fig. 2 Pilot air classifier

Fig. 3 Effect of $N_{sep.}$ and P_3 on d_e

Fig. 4 Function of classifier

(a) Fractional recovery curve

(b) Particle size distribution curve

Fig. 5 Relation between α and β

Fig. 6 Relation between R and F

Fig. 7 Relation between P_3 and R_{26}

Fig. 8 Initial response

Fig. 9 Application of on-line fineness meter to the grinding system (an example)

Table 1 Fineness of typical normal portland cement