エア・ブレンディングによる粉体の混合速度*

The Mixing Rate of Solid Particles by Air Blending

安藤 公二** 田保 英明**

Koji Andou

Hideaki Tabo

原 弘**

Hiroshi Hara

1. 緒言

固体混合操作としてのエア・ブレンディングは、主としてセメント工業に、広く常用されているが、その操作特性に関する基礎的知見は数少ない。

本研究は、この種の基礎実験として、同一粒径の粉体を用いて、混合実験を行ない、エア・ブレンディング法の特徴である不均一通気が、混合速度におよぼす影響について、実験的に検討し、二次元可視装置を用いて、混合過程とフローパタンとの関連について観察を行ない、活性、不活性部よりの流速比が、混合過程を規定する特性値となりうることを示している。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略を図1に示す。内径12cmφの透明アクリル製円筒を、混合槽本体として用いている。整流部は図示のごとく、槽底中心を通る中央で仕切れられ、ともに

図1 実験装置図

ガラス球（粒径0.7cmφ）とアルミナビーズ（粒径0.3cmφ）を二層に充てんしている。その上にろ布を張ったものを通気板とした。

2.2 混合試料

ポリ塩化ビニル樹脂の粉体を実験試料として用いた。その粒径は0.010~0.015cmである。静電気による粉体粒子間の凝集および壁面への付着を防止するため、あらかじめ、帯電防止剤で処理した。塩ビ粉体を黒色直接染料で染色し、追跡粉体として用いた。試料の物性値を表1に示す。

表1 使用粉体の物性

真密度	1.4 g/cm ³
かさ密度	0.5 g/cm ³
安息角	38度
形状	ほぼ球形
粒径	0.01~0.015cm
流動化開始速度	0.72 cm/sec

2.3 実験方法

通気板のうち空気流速の大きい部分(活性半円)、小さい部分(不活性半円)それぞれの流速を u_1 , u_2 とし、ともに同一の速度で通気させたときの流動化開始速度を u_{mf} とする。不活性部通気速度を u_{mf} 以上にとって実験を行ない、活性部通気速度の最大値は、本実験では、ほぼ $4 \cdot u_{mf}$ にとっている。

最初に活性半円および不活性半円の空気量を、それぞれのバルブfの操作により設定し、バルブeで通気をしゃ断しておく。つぎに、活性、不活性半円の境界に仕切板をさしこみ、活性半円上には着色粉体、不活性半円上には非着色粉体を充てんする。着色粉体の全粉体に対する充てん比は、約0.5である。粉体を充てんした後、仕切板を引きあげ、バルブeを開いて、一定時間混合させた後、バルブeを閉じて通気をしゃ断する。この静止した状態のもとで、サンプリングを行なう。以下同じような操作をくり返して実験を行なった。

2.4 サンプリングおよびトレーサー濃度測定法

図2にサンプリングの位置を示す。各サンプリングの位置は、横軸にP, Q, R, 縦軸に下から1, 2, 3, と番号を設定し、座標を用いてその位置を表わすように

* 昭和45年6月8日受理

** 室蘭工業大学化学工学科 (〒050室蘭市水元町27-1)
TEL 0143-4-4181

図2 サンプルングの位置

図3 粉体サンプラー

した。P, Q, R, 軸上から充てんした粉体層の上部, 中央部, 底部の3つの位置, すなわち計9個のサンプルを採取した。図3に示すようなプラスチック製の2重円筒によって, サンプルングした。P, Q, R, 各点の試料が混じらないように, 内円筒は3つの部分に仕切られている。

採取した粉体を0.3~0.4g秤量し, 一定割合の熱湯を加え, 温浴中に1時間保ち染料を脱色させ, 上澄液の着色の程度を光电比色計を用いて測定した。黑色粉体の割合が既知の試料を用いて, 同様の操作により検量線を作り採取した粉体中の黑色粉体の割合(以下トレーサー濃度とよぶ)を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 混合過程

各サンプルング位置におけるトレーサー濃度 C_i と混合時間 θ との関係を図4~7に示した。時間 $\theta=0$ において, 活性半円上には着色粉体のみであり, トレーサー濃度 $C_i=1.0$, 不活性半円上は非着色粒子のみであり, $C_i=0$ とする。図中の水平な点線は, 均一混合時のトレーサー濃度を示している。図4, 図6は u_1 と u_2 の比が1, すなわち通常の流動層の場合に相当し, 図5, 図7は u_1 と u_2 の流速が異なる, すなわち不均一通気の例である。各グラフとも, 混合時間の経過とともに, 均一濃度に近づいているが, 前者の条件ではP, Rの位置における濃度が, 点線に漸近するのに対して, 後者では混合初期に点線をこえ, 交錯するという過程が本実験では認められた。これは, 均一通気の場合の混合が, 主と

して空間的に不均一な粒子群の交換に依存するのに対して 不均一通気の場合は, 後述する循環流に依存する割合が大きいためと考えられる。

図4と図5, 図6と図7, はそれぞれ平均流速 $\bar{u}^*$ が

図4 各サンプルング位置のトレーサー濃度と混合時間の関係(1)

図5 各サンプルング位置のトレーサー濃度と混合時間の関係(2)

図6 各サンプルング位置のトレーサー濃度と混合時間の関係(3)

$$* \bar{u} = (u_1 S_1 + u_2 S_2) / \frac{\pi}{4} D^2$$

S_1, S_2 : 活性部, 不活性部の通気板の面積

図7 各サンプリング位置のトレーサー濃度と混合時間の関係 (4)

等しい条件で操作されている。図を比較すれば、明らかに、図4より図5、図6より図7の方が短時間に均一化される傾向が現われ、エア・ブレンディングの特徴である不均一通気の混合速度への寄与の大きいことを示している。

さらに、均一通気の場合は、P点、R点、はともに同じ速度で、漸近線に近づくのに対して、不均一通気の場合には、RよりPの方が混合の初期においては早く点線に近づいている。すなわち、活性半円に比して、不活性半円の部分が混合されにくいことがわかる。そして、不活性半円側でも特に混合槽底近傍のP-1、P-2点の混合が遅いことが推定される。したがって、実操作にみられるように、一定時間後、活性半円と不活性半円を交換することが、全体の混合速度を増大させる有効手段となろう。

3.2 混合速度係数

サンプリングした粉体のトレーサー濃度の分散 s^{2**} を算出し、その時間的变化を示した代表例が図8である、図中 s_0^{2***} は、混合前の分散である。図示のごとく、混合のごく初期をのぞいては、分散 s^2 は混合時間 θ とともに、指数的に減少している。大型装置について、同種の実験的試みを行なった H. Klein¹⁾ と類似の傾向が現われている。

本実験結果を次式によって近似し、混合に関する時定数の逆数 ϕ をもって、混合速度係数と定義する。

$$\frac{s^2}{s_0^2} = e^{-\phi\theta} \quad \dots\dots(1)$$

$$** \quad s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2$$

N: サンプル数, $\bar{C}$: C_i の平均値

$$*** \quad s_0^2 = \bar{C}(1 - \bar{C}) = 0.25$$

図8 混合曲線

図9 混合速度係数 ϕ と u_2/u_1 の関係

図10 混合速度係数 ϕ と u_1/umf の関係

図8の傾きから求めた混合速度係数 ϕ と、活性半円、不活性半円の通気速度比 u_2/u_1 との関係は、図9に示した。 umf を基準とした不活性半円の通気速度 u_1/umf が等しければ、混合速度係数と両通気板の通気比の関係は同一の相関関係が保たれている。 u_1/umf と ϕ との関係を知るため、 $u_2/u_1 = 2.0$ における ϕ と u_1/umf をプロット

トしたものが図10である。

以上の結果から、混合速度係数に関する実験的相関は

$$\phi = k_1 \exp \left[k_2 \left(\frac{u_2}{u_1} \right) + k_3 \left(\frac{u_1}{u_{mf}} \right) \right] \quad \dots\dots (2)$$

$$k_1 = 3.2 \times 10^{-3}$$

$$k_2 = 1.4$$

$$k_3 = 1.2$$

となる。

4. 二次元モデルによるフローパタンの観測

エア・ブレンディング装置内部の粉体の挙動を知るため、図11に示すような、二次元可視装置をつくり、そのフローパタンを観察した。図12は、混合過程の一例である。図13に、図12のような粉体の流れをモデル的に示した。すなわち、粒子運動は、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ の循環流を形成し、激しい運動を行なう活性半円上のB、C点では、粒子の交換は著しい。B、Cを経て移動した粉体群は、D点に堆積し、ついでA点に移動する。 u_1/u_2 が大となると、この循環流は速くなる。

混合速度は、上記のような循環流と、空間的に不均一な粒子群の交換とに依存し、(2)式の u_2/u_1 の項はこの循環流を、 u_1/u_{mf} はむしろ、局部的混合に寄与する交換速度の大小を、左右しているものと考えられる。

図11 二次元可視実験装置図

C_i : トレーサー濃度 (黑色粉体の割合)

$\bar{C}$: C_i の平均

D : ブレンディング槽直径

L : 粉体充填高さ

N : サンプル数

S_1 : 活性半円の通気板の面積

S_2 : 不活性半円の通気板の面積

s^2 : 分散

記

[—]

[—]

[cm]

[cm]

[—]

[cm²]

[cm²]

[—]

号

s_0^2 : 混合前の分散

u_1 : 活性半円の通気流速

u_2 : 不活性半円の通気流速

$\bar{u}$: 平均通気流速

u_{mf} : $u_1 = u_2$ での流動化開始速度

θ : 混合時間

ϕ : 混合速度係数

[—]

[cm/sec]

[cm/sec]

[cm/sec]

[cm/sec]

[sec]

[sec⁻¹]

図12 通気直後の混合状態

図13 粉体のフローパタン

なお、槽径の影響については、今後詳細な検討を行なう予定であるが、 k_3 は槽径の増大とともに減少する結果が認められ、槽径の増大とともに、両通気板の通気比 u_1/u_2 の混合速度係数への寄与が大きくなるものと推測されている。

5. 結 言

エア・ブレンディング装置の混合速度係数と粉体のフローパタンとを合わせて検討し、下記の結論を得た。

1. 混合速度係数 ϕ は(2)式で近似され、活性半円、不活性半円の通気比 u_1/u_2 が大きくなると、 ϕ は大きくなる。

2) 不活性半円——特にその底部——が混合の律速になっている。

引用文献

- 1) Klein, H : *Zement—Kalk—Gips*. 15. 399 (1962)

Abstract

The Mixing Rate of Solid Particles by Air Blending

Koji Andou, Hideaki Tabo, Hiroshi Hara
Muroran Institute of Technology

Experiments were carried out to obtain basic informations on mixing rate of solid particles by air-blending. Using a cylindrical apparatus of 12cm in diameter, Mixing rate was calculated from the variation of concentrations of marked particles sampled from the mixture. Results obtained were :

- 1) Coefficient of Mixing rate ϕ was expressed by

$$\phi = k_1 \exp \left[k_2 \left(\frac{u_2}{u_1} \right) + k_3 \left(\frac{u_1}{n_{mf}} \right) \right]$$

Where, u_2 is the velocity of air issued from active part of perforated plate, u_1 is the velocity from non active part of perforated plate and n_{mf} is the incipient fluidization velocity measured on the condition $u_1 = u_2$.

- 2) The exchange of position of solid particles in the region above the non active part of perforated plate determines the degree of Mixing by air blending.

〔書評〕

Industrial Uses of Mechanical Vibrations

I. Gutman 著

Business Books Limited (London), 1968年, 定価 5,670円

振動現象をさまざまな産業分野で応用する上での理論と実験について展望した本である。機械加工や材料試験や土木機械など対象は広いが、主力は粉体関係の機械におかれている。vibratory conveyor (約140ページ), spiral elevating conveyor と hopper (約50ページ), vibratory sieve と関連機器 (約110ページ), vibratory compaction and tamping (約15ページ), vibratory mills for fine comminution (約10ページ) と、粉体工

学関係の操作が非常に多い。いずれも定常線形の振動ばかりであるから、理論的取扱いも別に難しいものではないが、しっかりしているし、実際的问题にもくわしく、研究者にも実務家にも役立つ好著である。例によって日本の文献がほとんど全く引用されていないのは残念であるが、ソ連の文献が非常に沢山 refer されており、この点でも興味を引く。

(Z)