



低アルカリ高品質セメント製造プラント向け原料調合制御システム

Raw Meal Mixing Control System for Low Alkali Cement Production Plant

鈴木 健治 森平 直樹 常松 正巳

コンクリート構造物のアルカリ骨材反応による劣化を抑制する対策の一つとして低アルカリセメントを使用するという手段がある。低アルカリセメントの安定的な製造を可能とするために、セメント製造プラントの原料調合工程において従来から使用してきたHM, SM, IMの3つの制御指標に、新たにアルカリ含有率(R_2O)を制御指標に追加した調合制御システムを開発した。このシステムの有効性をシミュレーション及び実機試験運転で確認した。このシステムは、実運用に供しており、原料調合工程の自動化及び高品質セメント製品の安定生産に寄与している。

1. まえがき

コンクリート構造物においては、アルカリ骨材反応による経年劣化が問題となっている。アルカリ骨材反応とは、セメント中のアルカリ成分と骨材のシリカ質が反応することで、異常膨張をおこしひび割れが生じる反応のことである⁽¹⁾。アルカリ骨材反応を抑制するには、反応をおこしにくい骨材の使用や、アルカリ含有量の低いセメントを使用するという方法がある。良質な骨材が安価に大量に得られない場合には、低アルカリのセメントを使用しなければならない。

セメントの製造に当たり、セメントの性質・品質の管理指標として一般に水硬率(HM), 硅酸率(SM), 鉄率(IM)の3つの指標が用いられているが、上述のような低アルカリセメント安定供給の必要性から、新たにアルカリ含有率(R_2O)を第4の指標として取り扱う新しい原料調合制御システムを開発したので報告する。

2. セメント製造工程の概要

図1にセメントプラントの全景写真を示す。写真中右側から原料工程、焼成工程、仕上げ工程となっている。原料工程は、石灰石、粘土、珪石、酸化鉄原料などのセメント原料を適当な割合に調合して原料粉碎ミルで微粉碎・混合し、プレ

ンディングサイロの中で均一に混合するまでの工程である。焼成工程は、原料混合物をサスペンションプレヒータや仮焼炉を経由してロータリーキルンに供給し、約1450の熱で一部が溶融するまで充分に焼成した後、冷却しセメントクリンカとするまでの工程である。仕上げ工程は、クリンカに適当な量の石膏などを加え、セメントミルで微粉碎して製品セメントとする工程である。

セメントの強度、水和熱、化学的抵抗性、乾燥収縮などの物理的・化学的性質は、セメントの化合物組成によって大きく影響され、セメントの品質管理上の目安となっている。セメントの品質管理に利用されている指標としては、CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂Oなどの主要成分組成の重量比率を用いて表現されるモジュラス値と呼ばれる品質指標がある。一般的には、水硬率(HM: Hydraulic Modulus), 硅酸率(SM: Silica Modulus), 鉄率(IM: Iron Modulus), アルカリ含有率(R_2O)などが用いられ、以下のように定義される。

まず、原料の成分組成ベクトル x を次式で表すこととする。

$$x = [x_C \ x_S \ x_A \ x_F \ x_N \ x_K] \quad (1)$$

ここで、添字は原料粉碎ミル出口での原料の各成分組成 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂Oの頭文字である。そうすると、品質指標であるモジュラス値ベクトル m は成分



図1 セメントプラント全景 右から原料工程、焼成工程、仕上げ工程。

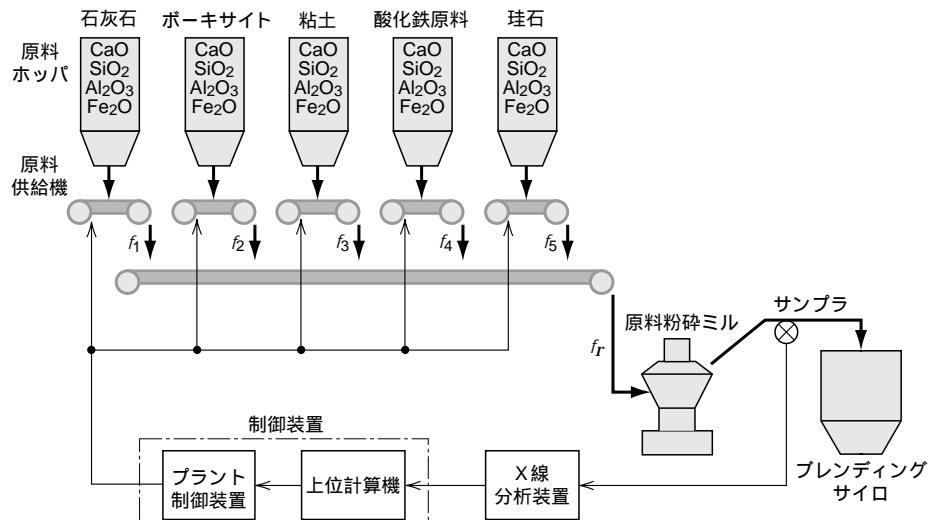


図2 セメント原料調合工程 複数の原料を原料粉碎ミルに供給し、微粉碎・混合する。混合原料を採取・分析しフィードバック制御を行う。

組成の分数式として次式で定義される。

$$m = [m_{HM} \ m_{SM} \ m_{IM} \ m_{R2O}]^T \\ = \left[\frac{X_C}{X_S + X_A + X_F} \ \frac{X_S}{X_S + X_F} \ \frac{X_A}{X_F} \ X_N + 0.658 \times X_K \right]^T \quad (2)$$

HMは最も重要であり、HMが大きくなると短期強度が高く水和熱の大きなセメントができる。SMが大きくなると燃料を余計に必要とし、長期強度型のセメントとなる。IMが大きいと短期強度は高いが水和熱が大きく、化学的抵抗性の小さいセメントができる。R₂Oは、セメント中に含まれるアルカリ成分(Na₂O, K₂O)の含有率を示す指標であり、Na₂O換算値として表されている。

このように、各原料をどのような比率で調合するかによって、製造されるセメントの品質が決定することになる。さらには、後工程の焼成工程においてキルンでクリンカに焼成する際に、混合原料の性状(化学組成、粉末度)によって易焼成が変化するため、あらかじめ原料工程において混合原料の性状を均一にすることがキルン運転の高効率化・安定化につながる。

3. セメント原料調合制御システム

原料調合制御系の概念を図2に示す。この例では、セメント原料は石灰石、ボーキサイト、粘土、酸化鉄原料、珪石の5種の原料が用いられている。原料ホッパには原料ごとに原石が蓄積されている。これらの各原料が原料供給機により原料粉碎ミルへ投入され微粉碎・混合される。サンプラは所定の周期で混合原料を採取し、その試料は前処理されてからX線分析装置で成分組成の分析が行われ、分析データは上位計算機に送信される。上位計算機は、所望の性状をもつ製品セメントを製造すべく各原料供給機の適切な供給量(調合比)を計算する。

原料調合工程の制御では、天然原料を使用するためにホッパ内の各原料の成分組成も実際には一定ではなく、これが外乱要因となる。さらには、原料粉碎ミルの搬送・通過時間やX線分析時の試料の前処理時間などプロセスとして数十分か

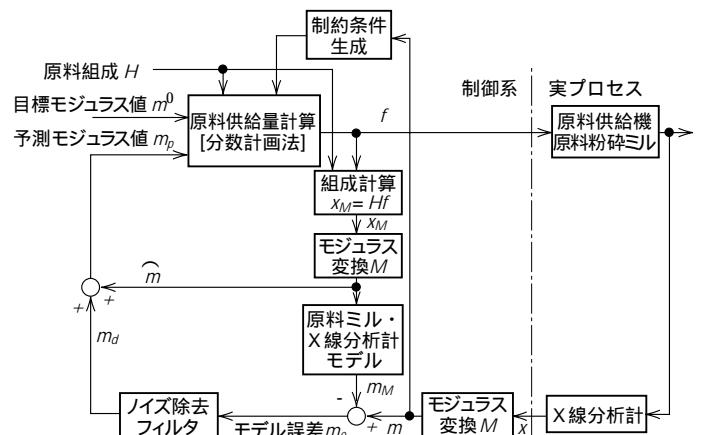


図3 原料調合制御システムブロック図 原料調合制御システムのブロック図を示す。

ら数時間単位の大きなむだ時間を含むプロセスであることが制御を困難にしている。

セメント原料調合制御システムは、このような困難を克服し、与えられた原料を使用して、前述の品質管理指標を所望の値に制御することがその目的となる。

3.1 最適調合比の導出

従来から原料組成と目標モジュラス値から連立方程式を解くことで、目標モジュラス値を実現する各原料の調合比を求める方法がある。しかしながら、変数の数(原料種数)が式の数と一致しないことにより、解が一意に求まらない場合や、いずれか1つないし2つ程度のモジュラス値のみを対象として制御する場合がある。また、この方式では、原料供給機の性能限界(上下限)を考慮していないために、得られる原料供給量がその範囲内に収まらずに再計算を繰り返すことがしばしばある。また、ホッパ内の原料成分組成の変動による外乱への対応が難しいなどの短所がある。

図3に新方式の原料調合制御システムのブロック図を示す。調合原料の成分組成の変動等の外乱抑制対策として、セメント品質指標であるモジュラス値の実測値を用いて、ホッ

パ内原料の成分組成と実際の成分組成との差を補正した予測モジュラス値を計算し、これを調合計算に使用する、いわゆるモデル予測制御方式を採用している。また、調合計算には線形分数表現された目的関数に関する最適化手法である分数計画法を使用している⁽²⁾。さらに、アルカリ含有率の実測値のフィードバックにより最適計算の制約条件を生成する部分で構成されている。このような構成をもつ本制御方式は次の特徴を有する。

- (1) 原料供給装置の能力(上下限)を考慮できる
- (2) 供給原料の成分組成の線形分数の形で表現されるモジュラス値がそのまま最適計算に使用できる

- (3) 連立方程式による解法ではモジュラス値を実現する解(調合比)が存在しない場合でも、モジュラス値が目標値になるべく近づくような最適計算を行う
- (4) 原料の成分組成の変動といった外乱の抑制やプロセスの大きなむだ時間の補償を行うことができる。

次に、最適調合比の算出方法について述べる。

図3に示した調合制御システムでは、予測モジュラス値ベクトル m_p と目標モジュラス値ベクトル m^o の差が最小となるように原料供給量を求める。ただし、各モジュラス値には、重みを付けていずれのモジュラス値を優先的に制御するかを調整する。これを定式化すると下記のようになり、原料供給機の性能限界の範囲内で、品質指標を満足するような最適な調合比を求めることができる。

$$\begin{aligned} & \underset{f}{\text{minimize}} \|w(m_p - m^o)\| \\ & \text{subject to } F = \left\{ f_j \mid f_{j \min} \leq f_j \leq f_{j \max}, \sum_{j=1}^5 f_j = f_T \right\} \text{ for } j=1 \text{ A } 5 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、

j : 各原料供給機の添字

$f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5]^T$: 原料供給機の原料供給量ベクトル

f_T : 総原料供給量

$f_{j \min}, f_{j \max}$: 各原料供給機の下限値、上限値

$w = \text{diag}[w_{HM}, w_{SM}, w_{IM}, w_{R2O}]$: モジュラス値の重み係数行列(対角行列)

この形式のように目的関数が線形分数形式で表現される問題を分数計画問題といい、分数計画法のアルゴリズムを利用し、線形計画問題へと帰着させて、最適化計算により解くことができる⁽³⁾。式(3)は、制約条件内で、予測モジュラス値と目標モジュラス値の偏差に重み付けして、その中で最も大きいものを最小化するような解を見つけるという意味をもつ。これにより、X線分析による原料組成の成分分析結果のフィードバック信号を用いて、要求される品質を満足するように原料供給機の供給量設定信号が計算される。

3.2 アルカリ含有率制御

一般にアルカリ成分は粘土に多く含まれることから、粘土はR₂Oを制御する上で最も支配的な原料となる。したがって、さらにR₂Oを効果的に制御するために粘土の供給量を制御する方式が考えられる。調合比計算部には、前述のように原料供給機の供給能力に関する上下限制約が分数計画法のアルゴ

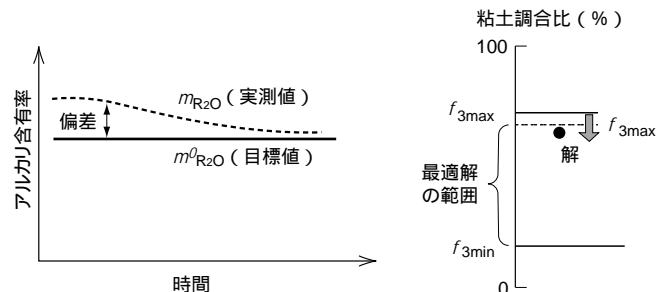


図4 アルカリ含有率制御概念 目標値と実測値の偏差に応じて原料調合比の上限制約を下方修正する。

リズムに含まれているので、見掛け上、粘土の原料供給機の上限値を下方修正することで粘土の供給量を制限し、R₂Oを制御する方式をとる。これを上限変動方式と呼び、この概念を図4に示している。粘土供給量の上限を変動させる方法では、供給能力の上限 $f_{3\max}$ 及び下限 $f_{3\min}$ 範囲内において、上限制約値を変動させる。変動させた上限値 $f'_{3\max}$ は、次式のように表される。

$$f'_{3\max} = f_{3\max} - \times (f_{3\max} - f_{3\min}) \quad (4)$$

ここで、係数 \times は0~1の範囲内で、目標値と実測値との偏差に応じて、PI制御的に計算される。つまり、R₂Oの実質値が目標値を越えた場合は、その偏差に応じて粘土供給量の上限制約を下げて最適解の範囲を狭めることで、粘土の供給量を制御しアルカリ含有率を低減している。

一方、粘土以外のアルカリ含有率の低い原料の下限制約を上方修正させて、間接的に粘土の供給量を減少させることにより、アルカリ含有率を低減することも可能である。

4. 制御試験結果

4.1 シミュレーション結果

シミュレーション計算による制御例を図5に示す。X線分析周期は実機とほぼ同等に2時間とし、制御演算周期は5分とした。計算開始から6時間で自動制御投入されている。初期状態としては、各制御指標は目標値からずれた状態にあるが、3サンプル(6時間)程度で目標値に安定的に追従していることが分かる。また、24時間経過時にR₂O目標値をステップ変化させている(0.57 → 0.50)が、これに対してもHM, SM, IMはわずかな変動のみでR₂Oが目標値に緩やかに追従していくことが示されている。R₂Oの実測値が目標値より大きい時には、粘土の供給比が抑制され、その分、珪石や他の原料供給比が増加していることが分かる。

4.2 実機制御結果

また、1時間周期で計測した約1週間分の実機での制御試験結果を図6示す。図には、自動運転時と手動運転時の各品質指標の標準偏差が示されている。原料粉碎ミル出口及びブレンディングサイロ出口とも、ほとんどの品質指標について、自動運転は手動運転に比較して標準偏差が小さくなっている。また、ブレンディングサイロ出口での各指標の基準は、HMで標準偏差0.05程度、その他の指標で0.10程度とされているが、このように実機試験結果では、これら基準を満たしていることが分かる。

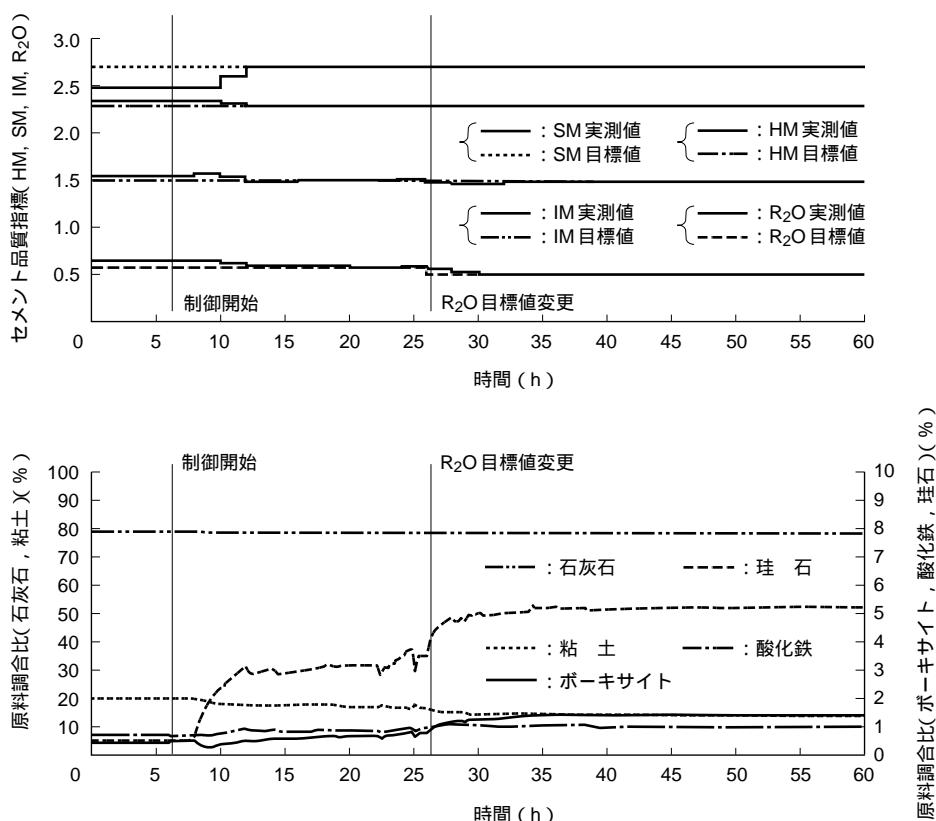
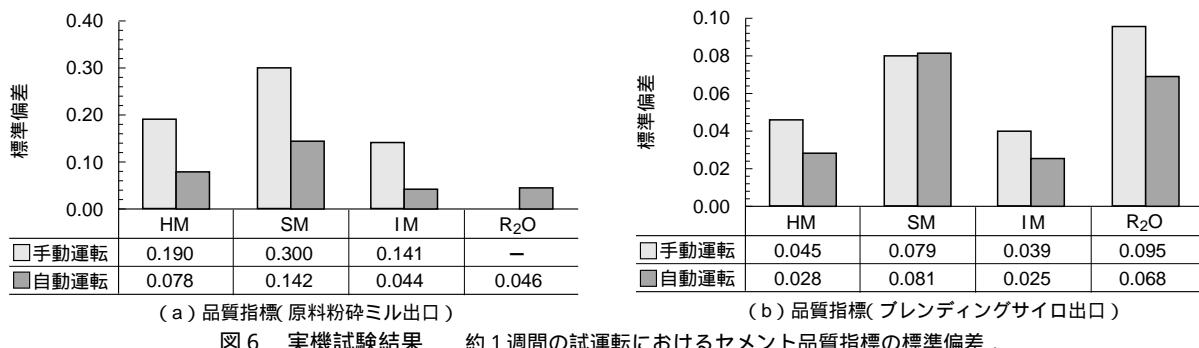


図5 シミュレーション結果（品質指標と原料調合比）
シミュレーション計算による制御
例．品質目標は、安定的に目標値へ追従している。



5. おわりに

従来のセメント原料調合制御システムに対し、アルカリ含有量という制御指標を追加し、当社独自の技術の採用により、安定的に低アルカリセメントの製造を可能にする制御システムを開発した。そして、実機における連続運転で、熟練運転員に匹敵する良好な制御性能を示すことを確認した。本制御システムは、実機において稼動中であり、セメント製造プラントの自動化・安定操業に寄与している。

本システムの開発に当たり実機試験及びデータ提供にご協力を頂いたベトナム Nghi Son Cement 社に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 山田順治編、セメントの実際知識、東洋経済新報社、(1975)

- (2) 中山弘隆ほか、多目的計画法の理論と応用、計測自動制御学会 (1980)
(3) 森平直樹ほか、分数計画法によるセメント原料調合制御法の開発、経営工学実践研究論文発表会 (1997-10)



鈴木健治
技術本部
広島研究所
制御システム研究室



森平直樹
名古屋航空宇宙システム製作所
航空機技術部
装備設計課



常松正巳
広島製作所
機械プラント技術部
電気制御設計課