

現在，設計基準は仕様規定から性能規定へ移行している．性能規定は，構造物全体やある部位の要求性能を規定して，あわせて性能の検証方法や試験方法を示す．つまり，構造物の完成までのプロセスは求められずに結果を求める方法である．材料や工法等のプロセスを規定しない性能規定の導入によって，技術者の裁量が広がるといわれる．設計や施工の自由度が増し，新技術が導入しやすくなる．技術競争が盛んになり，工事期間短縮やコストダウンのチャンスが増す．半面，個人や会社の技術力の差が如実に表れ，格差も広がる．しかしながら，性能規定の導入には課題もある．深刻な課題は，要求性能に達しているかどうかを確かめる検証方法や試験方法を確立するのが難しい．これに対して，合理的な構造物の耐久設計が重要になっている．

ある材料のキャラクターを知ることにより，この材料の性能または耐久性を予測することが可能となると思われる．コンクリート構造物の寿命を予測するためには，コンクリートのキャラクターを経時的に再現するモデルが求められる．コンクリートのキャラクターは，基本的にセメントと水の反応に大きく依存する．そこで，本研究は，コンクリートのキャラクターを経時的に再現するために，ポルトランドセメントの複合水和反応と組織形成モデルの構築を目的としたものである．このため，各種のクリンカー鉱物の水和反応速度および化学水和反応を定式化し，水和生成物を空間的に配置できるモデルを確立した．さらに，フレッシュ時の性質は硬化したコンクリートのキャラクターに反映するため，フレッシュ時におけるセメント粒子の凝集構造について理論的・実験的な検討を行った．

ポルトランドセメントの複合水和反応と組織形成を表現するための課題に対して，得られた主要な結論を列挙すれば次のとおりである．

## 1. 各種のクリンカー鉱物の水和反応速度の定式化に関しては

- (1) 各種のクリンカー鉱物の水和反応過程が異なるが，未水和粒子の表面への水の移動の機構が同一と考えられる．このため，各種のクリンカー鉱物の水和反応速度は粒子への水の浸透速度と等しいと仮定することは妥当である．
- (2) 浸透速度の基本式は，基礎浸透速度と比例しており，与えられた水和反応の因子における定数によって時間の経過に伴い浸透速度が減少していく．これらの定数は，浸透深さ，温度，水分の存在，粒子間の相互作用である．
- (3) 基礎浸透速度，遷移浸透深さおよび活性化エネルギーは，クリンカー鉱物の種類に依存することを設定した．
- (4) 水分は，空隙中に自由水と吸着水層の2種類があるため，自由水容積率と自由水表面積率を定める定数によって表現することができた．
- (5) 粒子間の相互作用の影響は基本的にその粒子と周りにある粒子の水和のための水の量に依存する．粒子ごとに水和反応を算出するため，粒子間の相互作用の影響を表現することができた．

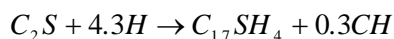
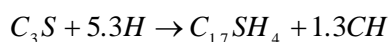
## 2. 各種クリンカー鉱物の化学水和反応の定式化に関しては

- (1) 既往研究に関する調査の結果により，ポルトランドセメントにおける主な水和物の化学組成について，CSHは $\bar{C}_{1.7}SH_4$ ，エトリンサイト (AFt) は $C_6AS_3H_{32}$ ，モノサルフェート水和物 (AFm) は $C_4ASH_{12}$ である．

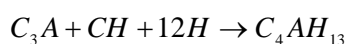
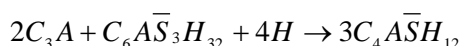
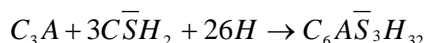
## 第 6 章 結論

- (2) ポルトランドセメントにおける各種クリンカー鉱物の化学水和反応は以下のとおりである．

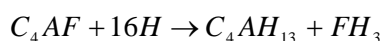
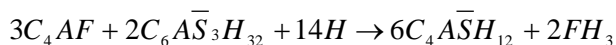
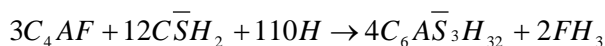
エーライトとビーライトの化学水和反応式：



アルミネート相の化学水和反応式：



フェライト相の化学水和反応式：



- (3) 既往の研究の調査結果と本解析結果からの各種のクリンカー鉱物および水和生成物の密度は以下のとおりである．しかし、セメントの水和反応と組織形成モデルの信頼性・再現性・精度を確認するためには、今後、各種のクリンカー鉱物および水和生成物の化学組成と密度を標準化することが必要である．

化学組成の略号	分子量 (g/モル)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	モル体積 (m <sup>3</sup> /モル)
C <sub>3</sub> S	228.3	3210	71.1×10 <sup>-6</sup>
C <sub>2</sub> S	172.3	3280	52.5×10 <sup>-6</sup>
C <sub>3</sub> A	270.2	3030	89.2×10 <sup>-6</sup>
C <sub>4</sub> AF	481.0	3730	128.9×10 <sup>-6</sup>
$\bar{C}\bar{S}H_2$	172.2	2320	74.2×10 <sup>-6</sup>
C <sub>1.7</sub> SH <sub>4</sub>	227.4	2120	107.6×10 <sup>-6</sup>
CH	74.1	2240	33.1×10 <sup>-6</sup>
AFt	1255.3	1700	735.2×10 <sup>-6</sup>
AFm	622.5	1990	312.8×10 <sup>-6</sup>
C <sub>4</sub> AH <sub>13</sub>	560.0	1900	294.8×10 <sup>-6</sup>
FH <sub>3</sub>	209.4	3000	69.8×10 <sup>-6</sup>
H	18.0	1000	18.0×10 <sup>-6</sup>

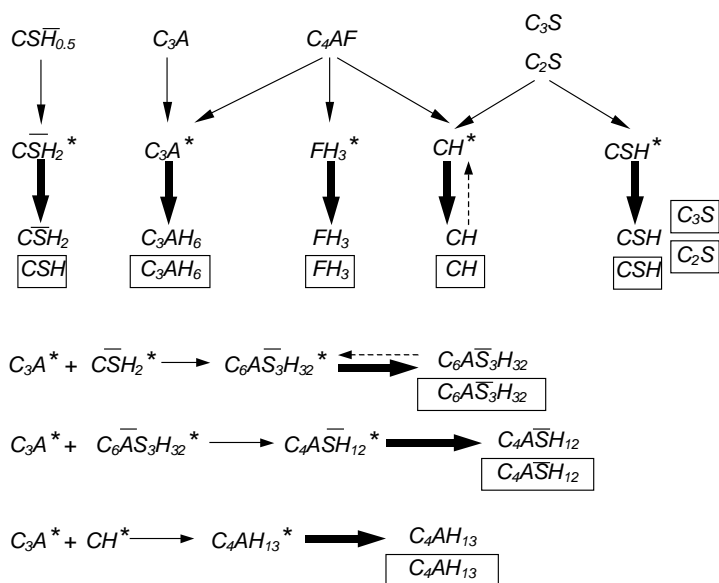
- (4) (2)と(3)の結論を用いて、水和生成物の配置場所を考慮せずに、各種の水和物の生成率と空隙率を算出することができた。水和率は第2章に定式化した各種クリンカー鉱物への水の浸透速度式によって水和率、水和生成物の生成率、全空隙率を算出することができた。

### 3. セメント粒子の凝集構造に関しては

- (1) DM28 の分割練混ぜ法はセメント粒子をよく分散させることを確認することができた。これは分割練混ぜの効果となっている。
- (2) セメント粒子がよく分散すると、ブリーディング率が低減し、水和反応速度が速くなり、均一な組織を持つことを明らかにすることができた。
- (3) セメント粒子の分散性あるいはブリーディングの現象はセメントの水和反応に大きな影響を与えることが明らかとなった。
- (4) 理論より4種の粒子の凝集構造があることが明らかにした。しかし、様々な要因があるため、本研究は練混ぜ方法によるセメント粒子の凝集構造をモデル化することまでに達成しなかった。コンクリート品質の予測に対して、セメント粒子の凝集モデルが重要であるため、これについては今後の課題とする。
- (5) EPMA を用いてペースト中の未水和セメントの観察によりセメント粒子の分散性を検討することができた。この結果はその他の測定方法の結果の傾向と同様である。また、EPMA 法もモルタル中の細骨材の遷移帯領域の諸性質を検討することができた。骨材の表面に水酸化カルシウムが多く存在することを確認することができた。
- (6) 異なる練混ぜで製造したモルタル中の遷移帯領域を比較すると、DM28 法の方が水酸化カルシウムを顕著に確認することができた。したがって、DM28 法で練り混ぜるとセメントから溶出する  $\text{Ca}^{2+}$  イオン濃度が高くなる。この結果も既往研究の結果と同様である。
- (7) セメントを水で混ぜると必ずしもセメント粒子が水中によく分散することは限らない。骨材とセメント粒子との間は壁効果があるため、遷移帯の形成メカニズムを明確にするためにはセメント粒子をよく分散させることが必要である。これに対して、適切な分割練混ぜ法がさらに重要になっている。

### 4. セルオートマトン法を用いたポルトランドセメントの水和反応と組織形成モデルに関しては

- (1) セルオートマトン法を用いることによって水和生成物を空間的に配置することが可能になるため、セメントペーストの硬化体の組織を再現することができた。
- (2) セルオートマトン法を用いたポルトランドセメントの水和反応過程は以下のとおりである。まず、未水和のクリンカー鉱物のセルへ水の浸透深さを計算し、完全に浸透したセルになると反応が生じて一時に溶出水和物イオンのセルの形になる。次に、セルオートマトン法を用いて溶出水和物イオンのセルを空間的に配置する。配置した溶出水和物イオンのセルは水和物の固体のセルになる。



- (3) 本研究が提案したシミュレーションの入力情報として，使用材料の物性値などを容易に定めることができることを確認できた．また，任意の条件に対応することが可能であった．
- (4) シミュレーション結果は，任意の条件で水和率をほぼ再現することができた．しかし，水和生成物の水酸化カルシウムおよび空隙率においてシミュレーション結果と計測結果の誤差は，水セメント比が大きいくほど大きくなる．この原因は，粒子の凝集構造とブリーディングの現象の他に，空隙質の化学反応式の定め方によると思われる．
- (5) コンピュータの性能の限界があり，セメントペースト硬化体の組織は nm のレベルであるため，セメント硬化体の組織を微視に再現することが困難で，特に，セメントペースト硬化体の空隙構造を分布的に表現するに至らなかった．しかし，コンピュータの進化により，今後はセルの寸法は nm のレベルで解析することができると思われる．