水和反応の進行にともなうセメント粒子の点過程特性値の変化

1. 序論

セメントペースト中の微視的構造を評価するための 強力なツールとして画像解析法がある.従来の画像解 析法では着目相の面積率を評価することが主目的であ ったが、コンクリートの物性を決定づける要因として は、着目相の量ではなく、それらがどのように分布し ているかがより重要な場合も多い.このような対象物 の空間分布を評価する方法として、評価対象の粒子を 点に置き換えてその分布状況を定式化していくという 点過程の考え方がある.粒子を点に置き換えることに より面積に関する情報を失うものの、単位面積当たり の点数(点密度)で量的な情報が提供できる可能性があ る.そこで本研究においてはこの点過程の考え方をセ メント粒子に適用し、水和反応の進行過程にともなう 点過程の基本パラメータである点密度の変化を明らか にすることを目的とする.

2. 実験概要

2.1 供試体および反射電子像観察試料の作製

普通ポルトランドセメント(密度=3.15g/cm³, 比表面 積=3310cm²/g)を使用し, JIS-R5202 および JSCE-F506 に従い水セメント比が 0.50 の直径 50mm, 高さ 100mm の円柱供試体を作製した. 打設後 24 時間において脱型 し, 所定材齢まで 20℃にて水中養生を行った. 材齢 1,

7,28,および91日において円柱供試体の中心部から 試料を切り出した.試料の凍結真空乾燥処理を行った 後,真空樹脂含浸装置を用いて低粘度エポキシ樹脂を 含浸させた.樹脂の硬化後,表面を研磨し金ーパラジ ウム蒸着処理を行って,反射電子像観察試料を得た.



図-1 セメント粒子の反射電子像から点過程像への

金沢大学	学生会員	永川	彰悟
金沢大学	正会員	五十嵐心一	

2.2 反射電子像観察および画像解析

走査型電子顕微鏡を用いて反射電子像をパーソナル コンピューターに無作為に10枚取り込んだ.このとき の観察倍率は500倍であり,1画像は1148×1000画素 から構成され,1画素は約0.22µmに相当する.取得し た反射電子像の2値化処理を行い,未水和セメント粒 子相を抽出した2値画像を取得した.抽出されたセメ ント粒子の重心位置を求め,各粒子を重心点で代表さ せて点過程に変換した(図-1).取得した2値化画像の 粒子の個数から画像の周縁をまたぐ粒子個数の重複カ ウントを防ぐためエッジ処理を行い,粒子の点密度 N_A(個/µm²)を求めた.また,取得した2値化画像を用 いてセメントの面積率を求め,これを体積率に等しい とした.得られた未水和セメント粒子の体積率を用い て,水和度を求めた.

2.3 セメントの粒度分布の変化

セメント協会が実施したセメント共同試験結果を Rosin-Rammler 式にて近似し、これを使用したセメン トの初期粒度分布と仮定した.その分布を図-2に示す.

2. 4 点密度のシミュレーション

セメント粒子は球状であり、水和反応はいずれのセ メント粒子も同様に粒子表面から進行し、それに伴い 粒度分布は小径側へと変化していくと仮定した.一定 の反応厚さを考えてセメント粒子を順次縮小し、未水 和セメント粒子の粒度分布の変化をそのたびに計算し て、水和度を求めた.なお、石灰石微粉末含有量とし て 5%を仮定し、これらは不活性であるとした.また、 その粒度分布はセメントのそれと等しいとした.シミ ュレーションされた粒度分布の結果に基づいてセメン





トペースト単位体積当たりのセメント粒子数である点 密度 Nv と平均粒子径 E[H]を求めた. DeHoff 式(式(1)) を用いて,その粒度分布にて想定される 2 次元平面に て観察される点密度 N_Aを計算した.

 $N_A = E[H]N_V$

(1)

3. 結果及び考察

図-3は2値化画像データから求めた水和度と点密度 の変化の関係を示したものであ.図より,水和反応の 進行にともない点密度が減少していることがわかる. 図-4は2値化画像から求めたセメント面積率と点密度 の関係を示したものである.両者の間には強い相関性 が存在する.このことから,水和進行過程を点過程の 考え方を用いて表すことは可能なようである.

図-5は2値化画像から求めたセメントの点密度とシ ミュレーションによって求めた点密度を比較したもの である.ここにシミュレーションは各材齢にて水和度 がほぼ等しくなるまで反応厚さを変化させたときの点 密度をプロットしている.初期材齢では両者の間にほ とんど差はみられない.しかし長期材齢ではシミュレ ーションの点密度がほとんど変化しない一方にて,画 像内で同定されたセメント粒子数はシミュレーション の結果よりもかなり小さくなる.これはシミュレーシ ョンにて水和進行過程を再現するとき 5%の石灰石が 残存し続けるために,点個数としては大きくなること



によると考えられる. さらに石灰石の粒度分布は必ず しも明らかではないが,石灰石はクリンカーよりも軟 いため粉砕過程にてセメント粒子よりも細かい粒子が 数多く含まれるようになる¹⁾.しかし,そのような微 細な粒子でかつ平均原子番号がセメント粒子よりも小 さいことから反射電子像中には同定されにくいようで ある.このため観察される粒子数がシミュレーション よりも小さな点密度となって表れたものと考えられる. しかしそのような場合であっても,材齢の進行に伴う 減少の傾向は同様であり,図-6に示すように,両者の 間には高い相関性があることが分かる.以上の結果よ り,明らかに点密度は水和反応の進行にともなうセメ ント粒子体積の減少を反映していると判断される.

4. 結論

2 次元の点過程を考えたときの基本パラメータであ る点密度と水和反応の進行の対応について明らかにし た. 点密度は残存セメント量と関連づけられるようで あるが, 点過程として水和反応過程をシミュレーショ ンするためには, 石灰石微粉末の影響についてさらな る検討を必要とする.

参考文献

 Taylor, H.F.W: Cement Chemistry, 2nd edition, Thomas Telford, 1997.