

セメントペーストの細孔構造予測のための水和反応シミュレーションモデルの構築

月の泉技術士事務所 正会員 渡邊 弘子
 東北学院大学 正会員 石川 雅美

1. 目的

凍害によるコンクリートの劣化を予測するためにはその細孔構造を把握することが重要であるが、細孔構造の測定結果は多くの要因の影響を受けるため同一配合でも一定値を得ることが難しい。そこで、セメントペーストの細孔構造を予測するための水和反応シミュレーションモデルを構築した。筆者らは以前同種の報告[1]をしているが、シミュレーション後の細孔面積の算出方法を改良し、より精度の高い結果を得たためここに報告する。

2. シミュレーションの仮定条件と計算結果

セメント粒子の水和反応のシミュレーションにあたっては現実の水和反応を表現することを目標としたが、現実の挙動を正確に模擬することは難しく、また、モデルを簡素化するために以下の仮定を設定した。

セメント粒子は真円と考える。

水和反応前の初期条件として普通ポルトランドセメントの一般的な粒径分布を与える。このとき、与えるセメント粒子の数は水セメント比に応じた値とする。

セメント粒子は時間のみに依存した単純増加成長をする。

セメント粒子は、水和反応により成長する過程で周囲に存在する他のセメント粒子に接触した場合には、その時点で成長を停止する。

セメント粒子は、周囲に存在する他のセメント粒子に接触しない場合でも、初期条件として与えられた半径の 2.0625 倍まで成長した場合にはその成長を停止する。これは、単純化したセメントの水和反応式を基に水和反応前後の水和物の質量比より求めた値である。

全てのセメント粒子が条件 または を満足したときを水和反応終了とする。

セメント粒子で埋められなかった空間、すなわちセメントペースト中の細孔はその面積と等しい円に置き換え、一つの細孔の大きさは置き換えた円の半径と考える。

以上の仮定に基づいた計算結果の一例（水セメント比 40%相当）を図-1 に示す。

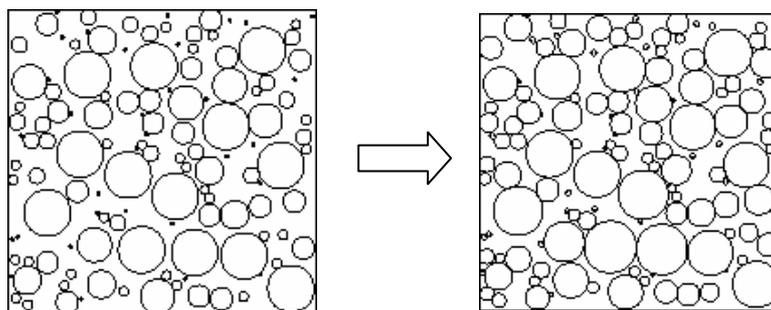


図-1 シミュレーション結果（左：初期状態、右：成長終了時）

3. シミュレーションの改良点

今回、水和反応終了後にセメント粒子で埋められなかった空間を抽出しその面積を求める方法として、ドロネイの三角形理論を用いた。これは図-2 に示すように、ある平面上に配置された点群について、その点を頂点とする三角形を与える手法である。以前の報告[1]では空間の抽出を画像解析により行っていたため、画面

キーワード 細孔構造, 水和反応, シミュレーション, セメントペースト, 凍害

連絡先 〒981-3101 仙台市泉区明石南 4-7-9 月の泉技術士事務所 TEL 022-218-2877

の解像度上 0.03×10^{-6} mm 以下の面積を判別することが不可能であった。しかし、この手法を用いることにより、シミュレーション後の細孔面積を数学的に算出することが可能となった。

本検討の場合、初期状態のセメント粒子の中心を点群と考え、細孔面積はドロネイの三角形で与えられる面積から成長後のセメント粒子の面積を差し引いて求めた。この考え方に基づき、図-1 に示したシミュレーションによる成長終了時の状態にドロネイの三角形を形成させた状態を図-3 に示す。

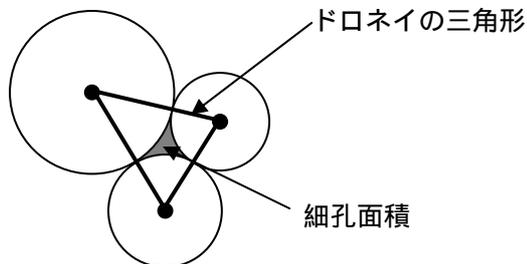


図-2 ドロネイの三角形と細孔面積

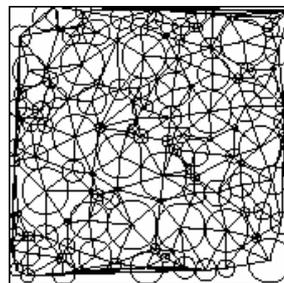


図-3 シミュレーション結果に形成させたドロネイの三角形

図-4 に新旧両手法を用いたシミュレーションによる細孔径分布を示す。旧手法では 0.03×10^{-6} mm 以下の径の細孔を全て 0.03×10^{-6} mm とカウントするためこの径の細孔量が非常に多くなっているのに対し、新手法では正規分布に近い細孔径分布を得られており、より現実の水和反応に近い反応をシミュレートしているものと考えられる。

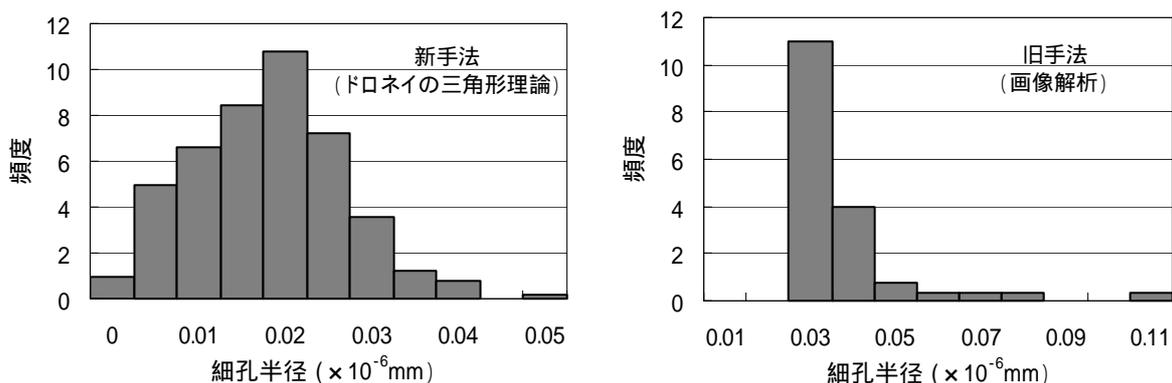


図-4 新旧両手法による細孔径分布の差異

4. 現状の問題点及び今後の課題

本モデルは多くの仮定条件から成り立っており、実際の水和反応を表現するためには今後の改良が必要と考えられる。まず、仮定 におけるセメント粒子の時間のみに依存した単純増加成長については、水和の進行が時間軸に対して一様ではなく時間の経過に伴って遅延するよう、成長速度を変化させる考慮が必要である。次に、仮定 におけるセメント粒子同士が接触した場合の成長停止については、接触していない方向に楕円に成長させる、円を数分割した扇形の集合体と考え接触していない扇形については成長を継続させる、あるいは円の中心を移動させながら成長させる、などの考慮が必要である。

5. まとめ

セメントペーストの水和反応シミュレーションモデルを構築し、数学的手法を用いて水和反応後の細孔を抽出しその面積を求めた。シミュレーションにより得られた細孔径分布は正規分布に近い分布を示すことができ、より現実の水和反応に近い反応をシミュレートできたものと考えられる。

参考文献

[1] 渡邊・石川：セメントペーストの細孔構造を予測する水和反応シミュレーションモデルの構築，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，1996年，pp.615-620