

低温養生したセメントペーストの内部組織の特徴と圧縮強度特性

金沢大学工学部 正会員 渡辺 暁央

金沢大学大学院 正会員 五十嵐心一

1. 序論

セメントの水和反応は温度依存性を有し、養生温度の相違により水和反応速度が変化する。また、養生温度が異なると内部組織の構造、特に細孔構造の形成も影響を受け、高温で養生を行うことにより細孔構造の粗径化が生じると言われている。著者らは、これまでセメント硬化体研磨面の反射電子像の画像解析法と Powers の水和反応モデルを組み合わせることにより水和度と内部組織の定量評価を行い¹⁾、高温養生を行うと粗大細孔領域にも粗径化が現れることを示した²⁾。すなわち、画像解析法は養生温度の相違による水和の進行と内部組織の変化を捉えるのに有効な手段であるといえる。

本研究では、低温にてセメントペーストを養生し、これに画像解析法と Powers モデルの組み合わせた手法を適用して、粗大径領域における細孔構造の特徴を明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合 普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm^3)を使用して、水セメント比が 0.25、0.4 および 0.6 のセメントペーストを作製した。なお、水セメント比が 0.25 のセメントペーストには、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。

(2) 養生方法 JIS R 5201 および JSCE-F506 に従って、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体に打設した。その後直ちに 5 および 20 の恒温室に静置した。打設後 24 時間にて脱型して、所定材齢までそれぞれの温度で水中養生を行った。

(3) 圧縮強度試験 (2)に記述した供試体に対して、材齢 1, 7, 28, 91 日において圧縮強度試験を行った。

(4) 反射電子像観察 (2)に記述したのと同様にして作製した供試体から所定材齢にて厚さ 10mm、直径 25mm 程度の円盤状試料を供試体中央部より切り出した。真空樹脂含浸装置にてエポキシ樹脂を含浸させた後、表面を耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを使用して注意深く研磨し、表面に金-パラジウム蒸着を行って反射電子像観察試料とした。

(5) 画像解析方法 4 分割型反射電子検出器を備えた走査型電子顕微鏡を使用して、観察倍率 500 倍にて、1 試料に対して 10 枚の反射電子像を取り込んだ(加速電圧 25kV)。1 画像は 1148×1000 画素からなり、1 画素は観察倍率 500 倍で約 $0.22\mu\text{m}$ に相当する。取り込んだ画像に対して二値化を行ない、毛細管空隙に相当する黒色の画素数をカウントし、1 画素当たりの面積を乗じて毛細管空隙の面積を求めた。その観察画像に対して面積率を算出し、これを体積率に変換して粗大毛細管空隙量(直径約 $0.2\mu\text{m}$ 以上)と定義した。さらに各々の毛細管空隙をラベリングし、それらの円相当径を求め、その円相当径の小さいものから並べ換えて細孔径分布を評価した。また、明度の高い未水和セメントについても同様に体積率を求め、初期のセメント量との差から水和度を求めた。

(6) 構成割合の計算¹⁾ (5)で求めた水和度の結果をもとに Powers モデルにより水和生成物量および毛細管空隙量を求めた。計算された毛細管空隙量から画像解析により得られた粗大毛細管空隙量を差し引いて、画像解析の解像度以下の微細毛細管空隙量(直径約 $3\text{nm} \sim 0.2\mu\text{m}$ 未満)を算出した。

3. 結果および考察

図-1 および図-2 は、それぞれ 5 および 20 で養生を行ったセメントペーストの内部構成割合の経時変化を示したものである。未水和セメントに着目すると、いずれの水セメント比においても 5 で養生を行った

キーワード：低温養生、反射電子像の画像解析、Powers モデル、水和度、細孔径分布

連絡先：〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20 金沢大学工学部土木建設工学科 TEL076-234-4622

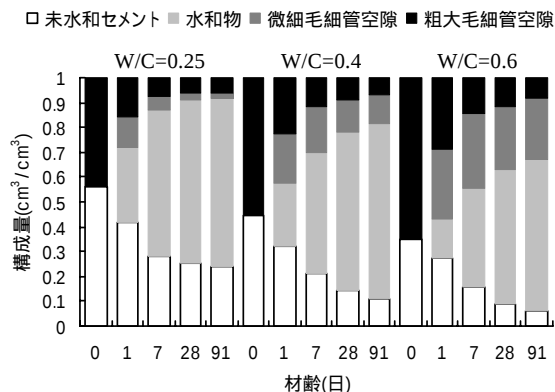


図-1 5 養生の構成相の経時変化

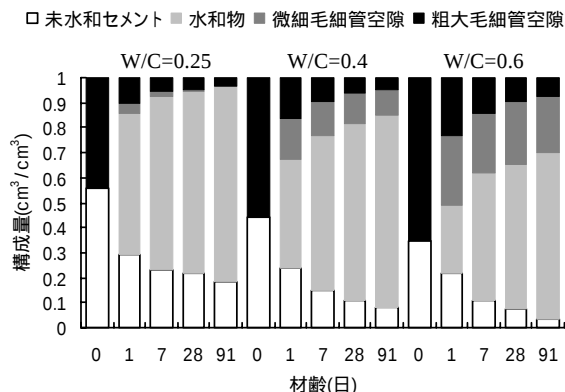


図-2 20 養生の構成相の経時変化

セメントペーストは未水
和セメント量が多く、
20 で養生を行うよりも
セメントの水和の進行が
遅いことが明らかである。
一方、毛細管空隙に着目
すると、低温で養生を行
ったものは水和反応の速
度が遅いため毛細管空隙
の減少割合も少なくなっ

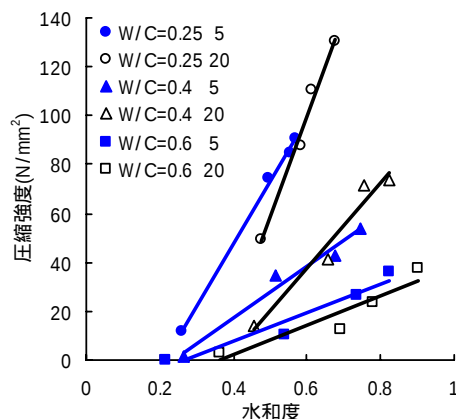


図-3 圧縮強度と水和度の関係

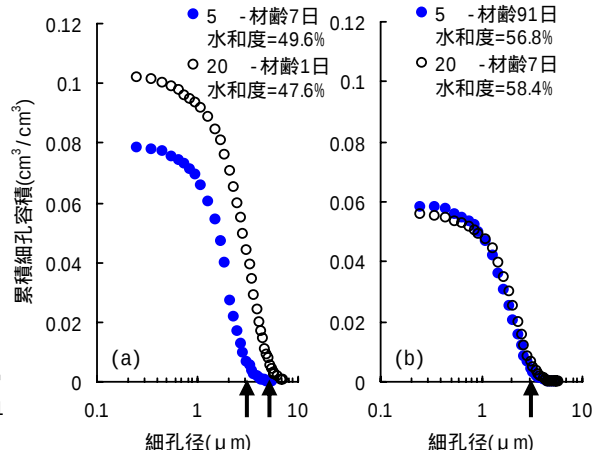


図-4 細孔径分布(W/C=0.25)(↑: 最大細孔径)

ているが、高水セメント比ほど養生温度による粗大毛細管空隙量の差は小さいようである。

図-3は、圧縮強度と水和度の関係を示したものである。両者の関係は、水セメント比および養生温度ごとに直線的に変化しており、良好な相関性を有している。5 で養生を行ったセメントペーストは、材齢7日程度までは、同じ水和度であっても低温で養生を行ったペーストの方が20 で養生を行ったペーストより高い圧縮強度を示す。しかし、材齢28日以降の長期材齢において圧縮強度と水和度の関係が、20 で養生を行ったものと同様の関係を示すようになる。

図-4は、水セメント比が0.25のセメントペーストについて、水和度がほぼ等しい養生温度5 の材齢7日と養生温度20 の材齢1日（図4-1(a)）、および養生温度5 の材齢91日と養生温度20 の材齢7日（図4-1(b)）の細孔径分布を比較したものである。5 で養生を行った材齢7日のセメントペーストは、同じ水和度の20 養生の材齢1日のペーストに比べて粗大毛細管空隙量が少なく、細孔径分布はより径の小さい側に移動し、最大細孔径も小さくなっている（図4-1(a)）。すなわち、粗大径領域の毛細管空隙構造はより微細化している。水和度が等しいため全毛細管空隙量に大きな差はないと推定されることから、強度特性に大きく影響を及ぼす粗大毛細管空隙の細孔構造が異なり、この相違が圧縮強度に差をもたらした一因と考えられる。一方、低温養生を材齢91日まで継続した場合は、同じ水和度の20 の材齢7日と比較して、粗大毛細管空隙量と微細毛細管空隙量の割合が等しく、細孔径分布にもほとんど相違はない（図4-1(b)）。そのため圧縮強度もほぼ等しくなったことが考えられる。

4. 結論

低温で養生を行うことにより、若材齢における粗大毛細管空隙構造が微細化し、この変化が圧縮強度特性に影響を及ぼすと考えられる。

参考文献 1) 五十嵐心一他: 反射電子像の画像解析によるセメントの水和度の推定と強度に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.14, No.2, pp.23-29, 2003. 2) 渡辺暁央他: 養生条件の相違によるセメントペーストの細孔構造の変化と圧縮強度特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.539-544, 2003.