

等空隙量下での粗大毛細管空隙空間構造の相違と強度発現の関係

金沢大学大学院 学生員 ○小池 祐輝
金沢大学理工学域 正会員 五十嵐 心一

1. 目的

セメント系材料は水和反応によって緻密な組織を形成し、強度や耐久性といった所要の性能を発現する。これらは水セメント比 (W/C) や養生条件に強く依存し、基本的には空隙構造の相違に帰着する。一般には、硬化体組織中の毛細管空隙量に着目した評価がなされるが、種々の配合条件においては、等空隙量であっても空隙空間構造は異なることが多い。

本研究では、W/C および材齢が相違する場合の等空隙率での粗大毛細管空隙空間構造に着目し、強度発現機構を点過程統計量の相違から論ずることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 反射電子像観察試料の作製 W/C が 0.25, 0.40, 0.50 および 0.60 のセメントペースト (直径 50mm, 高さ 100mm) を作製し、打設後 24 時間にて脱型し 20°C の水中養生を行なった。なお、W/C=0.25 の供試体については、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤をセメント質量の 0.5% 添加した。材齢 1, 7, 28 および 91 日において試料を切り出し、エタノールに 24 時間浸漬させた。凍結真空乾燥により内部水を除去した後、真空樹脂含浸装置を用いてエポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後、表面を注意深く研磨し、観察試料とした。

2.2 画像取得方法および画像解析 観察倍率 500 倍にて試料表面から無作為に 10 枚の反射電子像を取得した。1 画像は 1148×1000 画素からなり、1 画素は約 0.22μm に相当する。取得した画像に対してグレースケールに基づく 2 値化処理を施し、未水和セメント粒子および径 0.22μm 以上の粗大毛細管空隙 (径 0.22μm 以上) を抽出した 2 値画像を得た。また、画像解析ソフトウェアの機能を用いて、着目相の重心点位置座標を求め、これを位置ベクトル x_i とみなして点過程 $X=\{x_i; i=1, \dots, n\}$ とした。

2.3 点過程統計量 点過程統計量とは、観察視野 W に分散する点 $x_i \in X$ の分布パターンを、距離を変数と

する関数により定量評価する 2 次のステレオロジー量である。本研究においては K 関数および最近傍距離関数を用いて、空間分布特性の定量化を行なう。

(a) K 関数 ($\hat{K}(r)$) とは、任意の点から半径 r 内に存在する他の点個数の期待値を表わす。空隙重心点位置 $x_i \in X$ を中心とする半径 r の円領域 $b(x_i, r)$ 内に、他の空隙重心点 $x_j \in X (i \neq j)$ が存在するか否かを判定し、Ohser 法を用いて式(1)により算出した。

$$\hat{K}(r) = \frac{1}{\hat{\lambda}^2} \sum_{i \neq j} \frac{\mathbf{1}(\|x_i - x_j\| \leq r)}{s(\|x_i - x_j\|)} \tag{1}$$

ここで、 $s(x)$ は式(2)より与えられるエッジ補正係数であり、 a, b は観察視野領域の辺長である。

$$s(x) = ab - x(2a + 2b - x) / \pi \tag{2}$$

(b) 最近傍距離関数 ($\hat{G}(r)$) とは、点過程の点 $x_i \in X$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j \in X (i \neq j)$ を見出す確率である。全ての点 x_i の最近傍距離 s_i を算出し、Hanisch 法を用いて式(3)により算出した。

$$\hat{G}(r) = \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{1}(s_i \leq r) \cdot \mathbf{1}(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N \mathbf{1}(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \tag{3}$$

ここに、 $\mathbf{1}(\cdot)$ は () 内 が 真 で あ れ ば 1 を 与 え る 指 示 関 数 である。また、 b_i は各点 x_i から画像縁までの最短距離、 $w(s_i)$ はエッジ効果を考慮した重み付き関数である。

2.5 圧縮強度試験 2.1 と同様の条件で供試体を作製、養生を行い、所定材齢にて JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を行った。

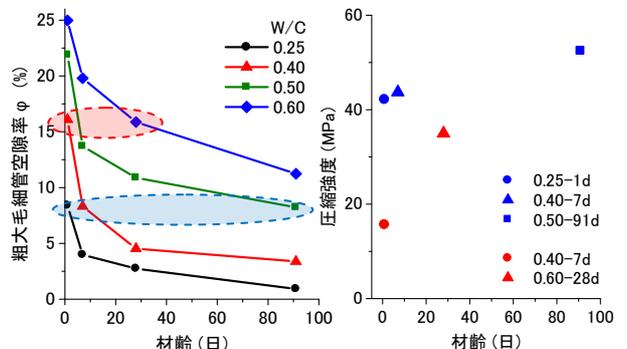


図-1 粗大毛細管空隙率の経時変化 図-2 空隙率に着目した圧縮強度の比較

キーワード ステレオロジー, 毛細管空隙, 点過程統計量, 圧縮強度, 空間構造

連絡先 〒920-1192 石川県金沢市角間町 金沢大学自然科学研究科社会基盤工学専攻 TEL 076-264-6373

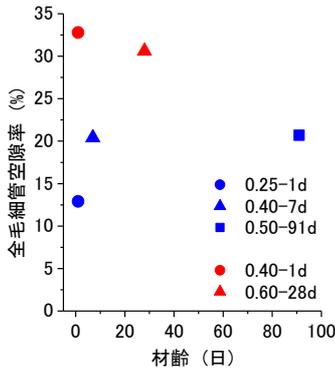


図-3 全毛細管空隙率の比較

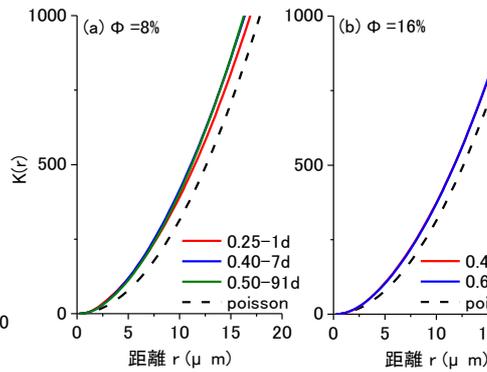


図-4 K関数の比較

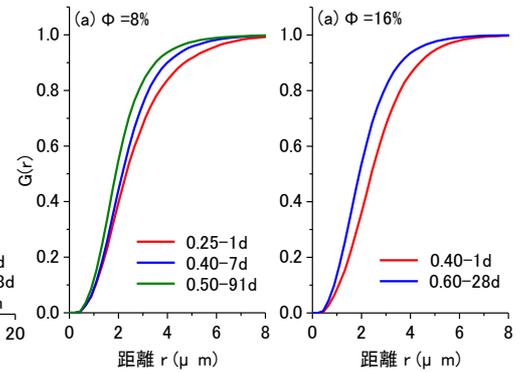


図-5 最近傍距離関数の比較

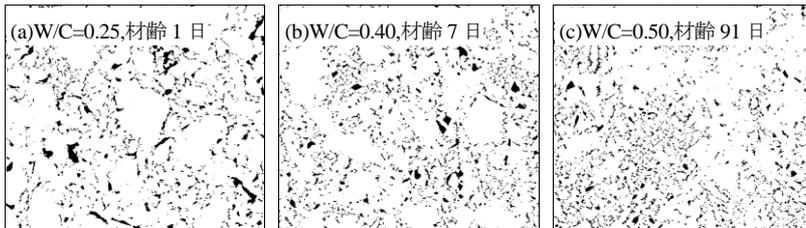


図-6 Φ=8%の粗大毛細管空隙 2値画像

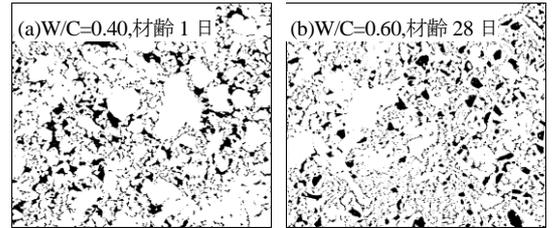


図-7 Φ=16%の粗大毛細管空隙 2値画像

3. 結果および考察

図-1 は、粗大毛細管空隙率の材齢の進行にともなう変化を示したものである。いずれの W/C においても、材齢の進行にともない空隙率は減少し、組織が緻密になっていく様子が認められる。本研究では、空隙率(Φ)のほぼ等しい Φ=8% (図中青枠)、Φ=16% (図中赤枠)の W/C および材齢に着目して考察を行う。

図-2 は、着目したセメントペーストの圧縮強度試験結果を示したものである。いずれの等空隙率においても、W/C が高く、長期養生を施したセメントペーストほど強度が大きい。ここで、未水和セメント粒子 2 値画像を用いて水和度を推定した後、Powers の水和反応モデルに基づき算出した全毛細管空隙率の比較を図-3 に示す。Φ=8%の場合、W/C=0.25 の値は他に比べて低い、強度は小さい。また、これを除いた W/C では全毛細管空隙率がほぼ等しく、図-1 と併せて考えると、分解能以下の毛細管空隙量もほぼ同一であるのに、強度には差が生じていることになる。したがって、空隙率といった 1 次パラメータではなく、空隙の分布や形状が強度発現に強く影響している可能性が考えられる。

図-4 は、粗大毛細管空隙の K 関数の等空隙率ごとに比較したものである。図中の破線は、完全ランダム分布である 2 次元ポアソン過程を示す。いずれの空隙率においても、K 関数値は破線に比べて若干大きく、粗大毛細管空隙は凝集分布を形成することがわかる。しかし、関数値の差は認められない。

図-5 は、粗大毛細管空隙の最近傍距離関数を等空隙

率間で比較したものである。いずれの空隙率においても、高 W/C ほど値 1.0 に収束する距離が短い。これは、任意の空隙重心点の近傍に他の重心点が存在する確率が高いことを意味する。

図-6 および図-7 は、図-1 に基づき着目した粗大毛細管空隙 2 値画像の例を示したものである。Φ=8%の W/C=0.25 では粗な空隙が点在し、W/C=0.50 では細かい空隙が広く分布している。空隙率は等しくても、粗大毛細管空隙空間構造は異なることが画像からも理解できる。一方、Φ=16%では、空隙の分散性や幾何学的特徴について、視覚的な印象では両者に明確な相違は認められないが、空隙を重心点に置き換えることにより、分布特性に差はなくとも、分布を特徴づける距離が大きく相違することがわかる。

等空隙率の場合、粗な空隙が存在する低 W/C に比べ、高 W/C で長期材齢であるほど、空隙寸法は小さい。また、Φ=16%のように W/C に拘らず粗な空隙が点在する場合においても、高 W/C の方が微細な寸法の空隙の占める割合は大きい。このとき強度も大きくなることから、圧縮強度が空隙寸法および空隙径分布に依存することが点過程統計量からも示されたといえる。

4. 結論

全毛細管空隙率および粗大毛細管空隙率が等しくても、粗大毛細管空隙の空間構造は W/C および材齢によって大きく異なることが点過程統計量から明らかとなった。さらに、強度発現を空隙空間構造の相違から説明することが可能であった。