

高温養生によるセメントペーストの電気伝導特性の変化と粗大毛細管空隙空間構造の対応

金沢大学大学院 学生員 ○内藤 大輔
 金沢大学理工学域 正会員 五十嵐 心一
 金沢大学大学院 学生員 柴山 舞

1. まえがき

養生温度を高くすることにより、材齢初期のセメントの水和反応は促進されるが、毛細管空隙構造は粗径化する。著者ら¹⁾は、2次のステレオロジー量を用いて、反射電子像で検出できる程度の粗大な毛細管空隙構造においても、毛細管空隙が粗径化することを定量的に示している。その一方で、前報にて²⁾、空隙の2次のステレオロジー関数から求められる多孔質材料の物質移動特性に関するパラメータが、セメントペーストの電気伝導率との間に良好な相関性を有することを示している。

本研究では、高温養生にともなうセメントペーストの粗大毛細管空隙空間構造の変化と電気伝導特性の関係を明らかにすることを目的とする。さらに物質移動パラメータの変化から、粗大な毛細管空隙構造の特徴が物質移動特性を反映する程度と内部組織形成の関係について検討する。

2. 実験概要

2. 1. 供試体作製

セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、JIS R 5201に従って水セメント比が0.40のセメントペーストを練り混ぜ、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℃および40℃で水中養生した。

2. 2. 反射電子像観察および画像解析

材齢1, 7, 28および91日にて供試体中央部から試料を切り出し、エタノールに浸漬した。さらにエタノールをt-ブチルアルコールに置換し、凍結真空乾燥を施した後、低粘度エポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後、試料表面の研磨を行い、反射電子像観察試料とした。観察倍率500倍にて反射電子像を取得し、グレースケールに基づく2値化作業を施し、未水和セメント粒子および粗大毛細管空隙(径0.22μm以上)の2

値画像を得た。取得した2値画像の面積率を対象材料の組織のランダム性を仮定したモデルベースのステレオロジーの原則に従い、体積率に等しいとした。また、得られた未水和セメント粒子の体積率と初期のセメント体積率との差から、水和度を算出した。

2. 3. 2点相関関数

2点相関関数とは、ある長さrを持った線分をランダムに画像上に落とした時、その線分の両端が同一相上に載る確率を表わす。空隙に関して求めた2点相関関数 $S_2^{(p)}(r)$ からは、多孔質材料の物質移動特性に関するパラメータλを求めることができる。その定義は[1]式に示すとおりであり、空隙構造における正の相関距離を代表する。一般に、この値が大きいくほど、物質移動は容易であると判断される。

$$\lambda = \left(\int_0^\infty [S_2^{(p)}(r) - \{S_2^{(p)}(0)\}^2] r dr \right)^{\frac{1}{2}} \quad [1]$$

2. 4. 電気伝導率の測定³⁾

所定材齢にて、直径100mm×高さ50mm程度の円盤型試料を切り出し、JSCE-G572およびASTM C 1202に準じて電気泳動法を実施した。供試体側面をエポキシ樹脂で塗布した後、真空飽水处理を施した。セル溶液には、0.3mol/Lの水酸化ナトリウム溶液を使用し、30Vの電圧を負荷した後、通電開始15分後の電流値を測定し、式[2]に基づき、電気伝導率σを算出した。

$$\text{電気伝導率 } \sigma \left(\frac{\mu S}{cm} \right) = \frac{I \cdot L}{V \cdot A} \quad [2]$$

ここに、Iは通電開始15分後の電流値(amps)、Lは供試体長さ(cm)、Vは電圧値(volt)、Aは供試体の投影面積を表わす。

3. 結果および考察

図-1は、養生温度の相違による水和度の変化を示したものである¹⁾。高温養生を施すことで、材齢1日ま

キーワード 養生温度, 粗大毛細管空隙, 相関距離, 粗径化, 電気伝導率, 物質移動特性

連絡先 〒920-0092 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 TEL076-264-6373

で、急激に水和反応が進行する。しかし、長期材齢にど認められなくなる。

図-2は、養生温度の相違による電気伝導率の変化を示したものである。材齢1日においては、高温養生した方が水和度が高いため、標準養生に比べて電気伝導率は小さい。一方、材齢28日以後における水和の進行程度はほぼ等しいにもかかわらず、標準養生の場合は電気伝導率が大きく低下しているが、高温養生の場合は、電気伝導率はほとんど変化しない。すなわち、図-1および図-2より、材齢91日においては両温度で毛細管空隙量はほぼ等しくとも、空隙の連続性や構造は大きく異なると考えられる。

図-3は、養生温度は異なるが、水和度がほぼ等しい材齢における粗大毛細管空隙の2点相関関数を比較したものである¹⁾。早期材齢において(図-3(a))は、高温養生を行うことにより、粗大毛細管空隙率が大きく増加している。一方、長期材齢になる(図-3(b))と、粗大毛細管空隙率は高温養生した方が小さくなるものの、空間構造を特徴づける距離である相関距離は、高温養生した方が大きい。すなわち、粗大毛細管空隙レベルにおいても、毛細管空隙構造の粗径化が認められる¹⁾。

図-4は、材齢の進行にともなうパラメータ λ の変化を示したものである。材齢が進行するにつれて、粗大毛細管空隙構造が緻密になり、 λ は減少する。しかし、その減少の程度は養生温度によって大きく異なり、高温で養生した場合、材齢の進行にともなう λ の変化は小さい。

図-5は、電気伝導率とパラメータ λ の関係を示したものである。 λ が小さくなると、電気伝導率も直線的に減少していくが、それらの相関の傾向は、養生温度によって大きく異なり、高温養生した方が、 λ の減少にともなう電気伝導率の減少割合が大きい。このことは、高温養生では、相関距離の減少が、系全体の伝導経路を、より直接的に反映していることを示している。また、長期材齢になり、 λ が変化しなくなると、電気伝導率は変化しないようである。一方、標準養生の場合は、粗大毛細管空隙レベルでの相関性が減少しても、画像の分解能以下の微細レベルにおける毛細管空隙の連続性が、高温養生の場合よりは、高いことを示している。以上より、たとえ電気伝導率が等しくとも、 λ が大きく異なることから、物質移動特性は、粗大毛

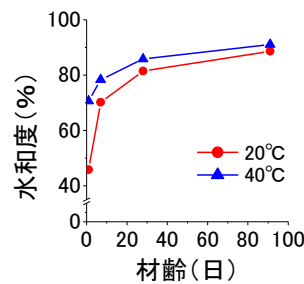


図-1 材齢の進行にともなう水和度の変化

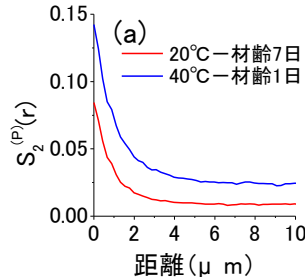


図-3 等水和度における粗大毛細管空隙の2点相関関数
(a): 早期材齢, (b): 長期材齢

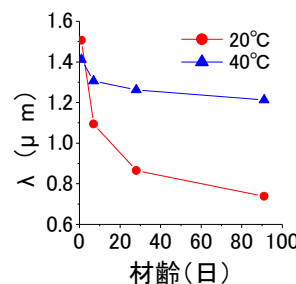


図-4 材齢の進行にともなう λ の変化

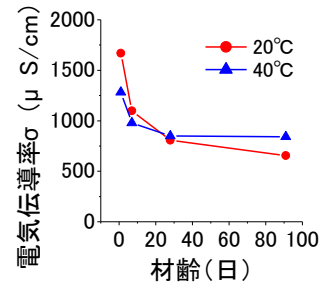


図-2 材齢の進行にともなう電気伝導率の変化

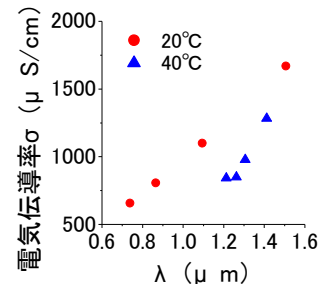
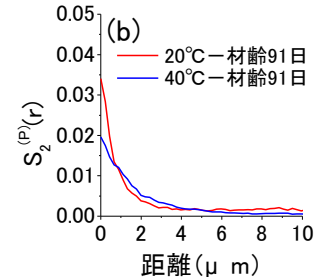


図-5 電気伝導率と λ の関係

細管空隙空間構造の特徴だけでは決定できないと考えられる。また、より微細なレベルにおける毛細管空隙の連続性が物質移動に関与し、それらが養生温度により大きく異なると考えられる。

4. あとがき

反射電子像観察により観察される粗大毛細管空隙の相関距離が小さくなるほど、電気伝導率は小さくなるが、変化の傾向は養生温度により大きく異なる。

参考文献

- 1) 内藤大輔, 五十嵐心一, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.561-566, 2008.
- 2) 内藤大輔, 五十嵐心一, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.62, 部門V, pp.753-754, 2008.
- 3) Nokken, M.R. and Hooton, R.D., Materials and Structures, Vol.41, No.1, pp.1-16, 2008.