

若材齢からの中性化の進行が微細組織の形成に及ぼす影響

金沢大学大学院 学生員 石田 聡史

金沢大学フレスコ壁画研究センター 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

コンクリートの中性化の影響を評価するにあたって、コンクリートの水和反応が十分に進行してから進む中性化と若材齢から進行する中性化の2つの場合に分けて考えることができる。水和反応が十分に進行した後には生じる中性化は基本的に既に形成された表層組織の緻密さの程度に左右されるが、若材齢から中性化が進行する場合は、中性化とともに乾燥による水分の逸散を生じ、内部の水和反応が阻害されることの影響を考慮しなければならない。これによって表層部の組織の特徴も変化することが考えられる。しかし、若材齢からの中性化が微細組織の形成に与える影響について論じた例は少ない。

本研究は、材齢初期から異なる二酸化炭素濃度の環境下にて、セメントペーストを養生した場合の供試体表面および内部の空隙空間構造の経時変化を明らかにし、それが電気伝導率に及ぼす影響を論ずることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント（密度： 3.15g/cm^3 ，比表面積： $3310\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用し、JIS R 5201 に準じて、水セメント比が0.50のセメントペースト供試体（直径100mm，高さ200mm）を作製した。打ち込み後24時間にて脱型し、直径100mm×高さ50mm程度の円盤型供試体を切り出し、供試体側面にエポキシ樹脂を塗布した。樹脂の硬化後、水中養生（温度 20°C ）、気中養生（温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ ，湿度 $60\pm 5\%$ ）、中性化促進養生（温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ ，湿度 $60\pm 5\%$ ，二酸化炭素濃度 $5\pm 0.2\%$ ）の3つの条件でそれぞれ所定の材齢まで養生を行った。

2.2 電気伝導率の測定

ASTM C 1202 に準じて電気泳動法を実施した。所定材齢にて、24時間の真空飽水処理を行い、セル溶液として 0.3mol/L の水酸化ナトリウム溶液を使用し、直流電源により30Vの電圧を負荷した後、15分後の電流値

を求め、以下の式[1]に基づき電気伝導率 $\sigma(\mu\text{S}/\text{cm})$ を算出した。

$$\sigma(\mu\text{S}/\text{cm}) = I \cdot L / V \cdot A \quad [1]$$

ここに、 I は電流値(amperes)， L は供試体長さ(cm)， V は電圧値(V)， A は供試体の投影面積(cm^2)を表わす。

2.3 反射電子像の取得および画像解析

材齢7，14，28，91日において円盤供試体から薄片試料を切り出した。また、気中養生および中性化促進養生を行った供試体は1%フェノールフタレイン溶液を噴霧することで呈色状況を確認し、供試体表面を中性化部、供試体中央を健全部として試料を採取した。その後、採取した試料をエタノールに浸漬して水分とエタノールを置換した。さらに t -ブタノールとの置換を行った後、凍結真空乾燥を行い、真空樹脂含浸を用いてエポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後、表面を耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを用いて研磨し、反射電子像観察試料とした。観察倍率500倍にて無作為に取得した10枚以上の反射電子像に対して、グレースケールに基づく2値化を行い、未水和セメントおよび粗大毛細管空隙（径 $0.22\mu\text{m}$ 以上）を抽出した。ステレオロジーの原理に従い、2値画像における着目相の面積率を体積率に等しいとし、未水和セメントの面積率から水饱和度を求めた。

2.4 2点相関関数

2値画像上に任意の長さ r の線分をランダムに落としたとき、線分の両端点 x_1 ， x_2 が同じ着目相(P)に載る確率として2点相関関数を求めた。2点相関関数 $S_2^{(P)}(r)$ の定義を[2]および[3]式に示す。

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & (x_i \in P) \\ 0 & (x_i \notin P) \end{cases} \quad [2]$$

$$\begin{aligned} S_2^{(P)}(r) &= \langle I(x_i)I(x_j) \rangle \\ &= P\{I(x_i) = 1, I(x_j) = 1\} \end{aligned} \quad [3]$$

ここに、 $I(x_i)$ は指示関数、 $r = |x_2 - x_1|$ であり、 $\langle \rangle$ は期

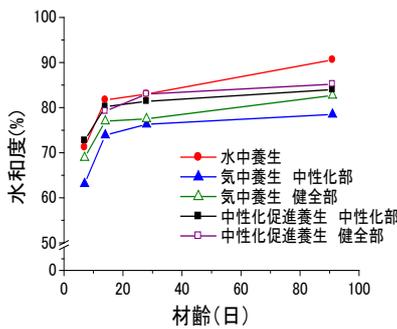


図-1 水和度の経時変化

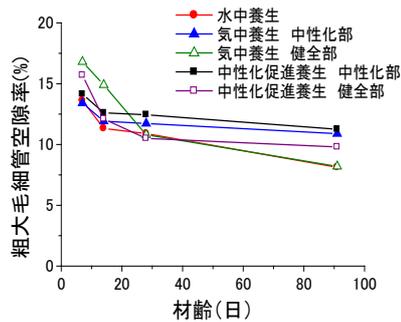


図-2 粗大毛細管空隙率の経時変化

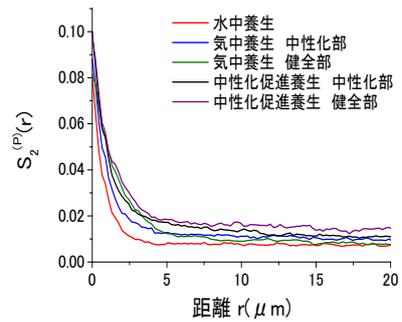


図-3 粗大毛細管空隙の2点相関関数 (材齢91日)

待値を意味する。

3. 結果および考察

図-1 は養生条件の異なる供試体の水和度の経時変化を示したものである。気中養生を行った供試体は中性化部、健全部ともに水中養生を行った供試体よりも常に低い値を示しており、乾燥の影響を強く受け、水和の進行が阻害されている。また、中性化部と健全部を比較すると、表面に近い中性化部のほうがより乾燥の影響を受けると考えられ、健全部に比べて低い水和度を示している。一方、促進養生を行った供試体では中性化部と健全部で同程度の水和度を示し、気中養生を行った供試体よりも高い値となっている。また、材齢初期においては水中養生と同様の増加傾向を示していることが確認できる。

図-2 は粗大毛細管空隙率の経時変化を示したものである。いずれの養生条件においても材齢の経過とともに粗大毛細管空隙率は低下しているが、気中養生、促進養生ともに中性化部の粗大毛細管空隙率の材齢14日以降の減少は小さい。

図-3は材齢91日における粗大毛細管空隙に関する2点相関関数を比較したものである。水中養生を行った供試体は気中養生、促進養生を行った供試体に比べて、構造距離が約 $3\mu\text{m}$ と小さいことがわかる。一方、気中養生、促進養生を行った場合、粗大毛細管空隙率に多少の差はみられるものの、中性化部、健全部ともに空間構造に大きな相違はみられない。

図-4 は電気伝導率の変化を示したものである。水中養生を行った供試体がもっとも低い電気伝導率を示している。気中養生を行った供試体は材齢7日の時点で水中養生よりも高い電気伝導率を示しており、材齢の経過による電気伝導率の減少も小さい。これに対し、促進養生を行った場合は、材齢14日までは気中養生を

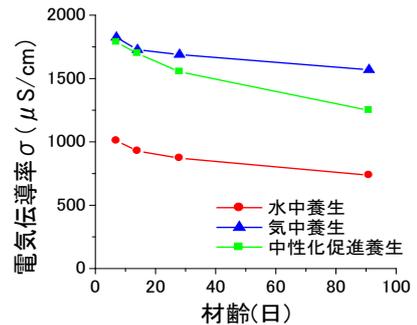


図-4 電気伝導率の経時変化

行った供試体とほぼ等しい値を示しているが、それ以後の材齢の進行にともなう電気伝導率の低下割合は水中養生を行ったものと同程度であり、組織の緻密化および伝導経路の遮断が継続している。

これらの結果より、気中養生と促進養生を行った供試体には水和反応の進行に相違がみられるにもかかわらず、粗大毛細管空隙率や空間構造には大きな差はみられないことがわかった。したがって、促進養生を行った場合の炭酸カルシウムによる充填は空隙全体に対してなされるのではなく、部分的に空隙経路を遮断するように充填していくと考えられ、このことが電気伝導率に違いが生じた理由であると考えられる。また、促進養生を行った場合、気中養生を行った場合よりも水分逸散を妨げるため、中性化部においても水和反応が進行し、電気伝導率の低下に寄与したと考えられる。

4. 結論

反射電子像の画像解析および電気伝導率の測定によって、材齢初期から進行する中性化が組織形成に与える影響について検討した。その結果、若材齢での中性化促進養生は、水和反応をより進行させ物質移動抵抗性を増大させるという点で気中養生よりも優れていることが明らかとなった。