

金沢大学大学院 学生会員 渡辺 暁央
 金沢大学工学部 正会員 五十嵐 心一
 金沢大学工学部 フェロー 川村 満紀

1. 序論

コンクリートの強度や耐久性は材齢の経過に伴い変化し、これはセメントの水和反応の進行に伴う内部組織の形成と対応する。この場合、養生条件の相違を考慮すると、材齢ではなくセメントの水和反応進行の程度（水和度）が組織形成を決定づける重要な要因の一つであり、コンクリートの物性や微視構造はセメントの水和度の関数である。この水和度を定量的に求めるために、これまでにいくつかの方法が用いられてきているが、コンクリートの研磨面の反射電子像の画像解析法もその1つである。反射電子像の画像解析法によって、セメントの水和反応過程における構成相の経時変化の定量評価が可能であるが、これまでは主としてポロシティーの評価に主眼が置かれ、水和度評価法としてのこの手法の適用性を詳細に検討した例はない。

本研究においては、普通セメントペーストに対して反射電子像の画像解析法を用いて得られた水和度と、より一般的な方法である結合水量により求めた水和度との比較から、水和度測定方法としての反射電子像の画像解析法の適用性について考察を加える。

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を使用し、水セメント比 0.4 および 0.6 のセメントペーストを作製した。

(2)結合水量測定試験 JIS R 5201 および JSCE-F506 に従って直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体を作製した。打設後 24 時間にて脱型し、その後所定材齢まで 20℃の水中養生を行った。材齢 1, 3, 7, 28 日において供試体内部から試料を採取し、直ちに 105℃の炉乾燥を行った。乾燥終了後の試料を用いて、1050℃まで強熱を行い結合水量を求め、その結果から次式によって水和度 α_{w_n} を求めた。

$$\text{結合水量 } LOI = \frac{W_n}{W_{1000}} = \frac{105^\circ\text{Cの炉乾燥後の質量} - 1050^\circ\text{Cで強熱後の質量}}{1050^\circ\text{Cで強熱後の質量}} \quad \dots\dots(1)$$

$$\alpha_{w_n} = \frac{LOI}{i} = \frac{\text{結合水量}}{0.23} \quad \dots\dots(2)$$

(3)反射電子像観察 (2)に記述したのと同様に作製、養生を行っ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、表面を耐水研磨紙で研磨し、反射電子像観察試料とした。また練り混ぜ時のセメント粒子体積率を測定するため、セメントとエポキシ樹脂を混合した試料を用いて、同様に研磨を行い反射電子像観察試料を作製した。

(4)画像解析方法 観察倍率 500 倍および 200 倍にて反射電子像を取り込んだ。取り込んだ画像に対して 2 値化を行い、未水和セメント粒子に相当する白色の画素数をカウントし、1 画素当たりの面積を

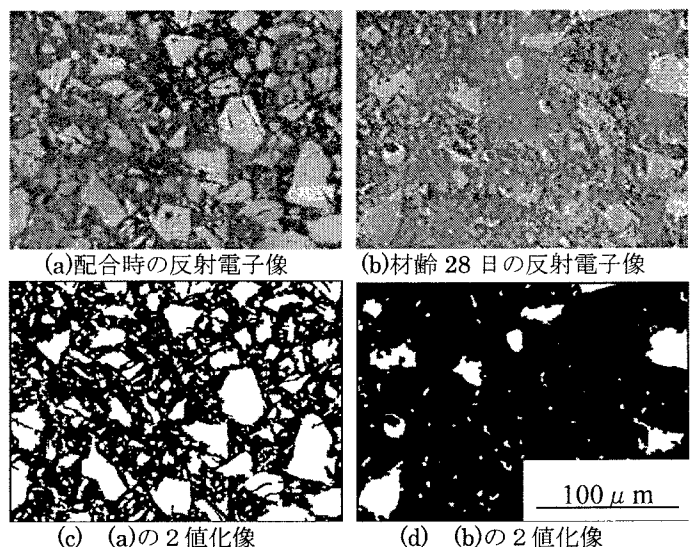


写真 1 未水和セメントに関する 2 値化の例(W/C=0.4)

キーワード：反射電子像、画像解析、強熱減量、水和度

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

乗じて未水和セメントの面積を求めた。水和度 α_{BEI} を次式により求め、結合水量測定試験結果と比較した。

$$\alpha_{BEI} = 1 - \frac{AN_{BEI}}{C_V} = 1 - \frac{\text{画像解析による未水和セメント体積率}}{\text{配合時のセメント体積率}} \dots\dots(3)$$

写真1は反射電子像および未水和セメント粒子に関する2値化の例である。

3. 結果および考察

図1は練り混ぜ直後(材齢=0)のセメントペーストに相当するようエポキシ樹脂マトリックス中に、セメント粒子を分散させたときのセメント体積率を、画像解析により求めた結果と、計算値を比較したものである。水セメント比が著しく低い場合、すなわちセメントの体積率が大きい場合に理論値と画像解析値の差が大きくなるようであるが、一般的な水セメント比の範囲では、両者はほぼ一致している。すなわち未水和セメント粒子を適切に識別、評価するならば、本画像解析法によって水和の進行に伴うセメント体積率の減少を正確に測定できることを示している。

図2は硬化セメントペーストの未水和セメント体積率と結合水量の関係を示したものである。得られた結果を最小自乗近似し、完全水和に相当する未水和セメント体積率=0の点を求めると、この値は水セメント比が0.4および0.6のいずれの場合も、結合水量は約25%となり、Powersの理論値(23~25%)とほぼ一致する。このようにして求めた値をx切片とし、結合水量=0、すなわち練り混ぜ時のセメント体積率をy切片として直線式を求めると、これが理論上のセメント体積率と結合水量の関係を表す。Scrivenerら[1]によると、画像解析により求めたセメントの体積率はこの理論値とよく一致し、このことから結合水量により求めた水和度と画像解析による水和度が一致するとしている。しかし、本研究の結果では、結合水量値が低いところ、すなわちセメント水和反応の早期段階では、必ずしも一致しているわけでない。

この理由として、画像解析を高倍率にて行くと、解析値が大きな粒子の存在の有無に大きく影響されることが挙げられる。すなわち観察倍率が500倍の場合、未水和セメント粒子の分布を代表する画像が得られないことが原因として考えられる。図3は水セメント比0.6の硬化セメントペーストの観察倍率を200倍として、未水和セメント体積率と結合水量の関係を示したものである。この場合、画像解析値は理論値と一致し、したがって図4に示すように、画像解析により求めた水和度 α_{BEI} と結合水量から求めた水和度 α_{Wn} がほぼ一致するようになる。一般に、反射電子像の画像解析によりセメントペースト中の内部組織を定量評価する場合、組織の変化勾配の抽出が重要となるため、観察倍率は400~600倍が適当であるとされている。しかしながら未水和セメント粒子のみを定量評価の対象として、水和度を評価することが目的である場合は、系を代表すると考えられる領域(RVE: Representative Volume Element)が対象領域となる低倍率の方が適切であると考えられる。

4. 結論

画像解析によって水和度を評価することの妥当性を検討すべく、セメントペースト中の未水和セメント粒子の体積率と結合水量の関係を検討した。一般に硬化セメントペーストの相を解析するために使用される倍率よりも低い倍率の方が安定した水和度の評価が可能であり、結合水量から求めた水和度と一致する。

参考文献 [1] Scrivener, K.L. et al.: Mat. Res. Soc. Proc. Vol.85, Materials Research Society, pp.67-76, 1987.

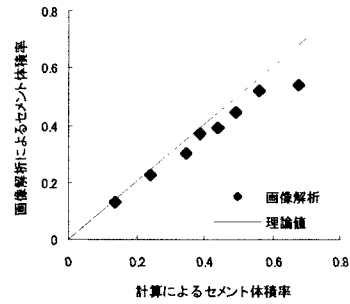


図1 画像解析による練り混ぜ直後のセメント体積率と配合から求めた計算値の関係

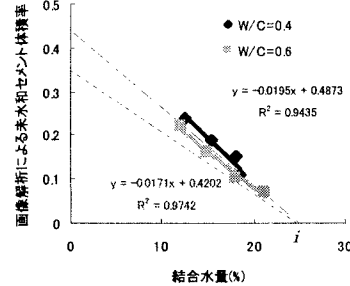


図2 画像解析によるセメント体積率と結合水量の関係(観察倍率500倍)

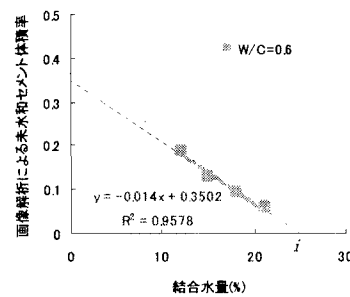


図3 画像解析によるセメント体積率と結合水量の関係(観察倍率200倍)

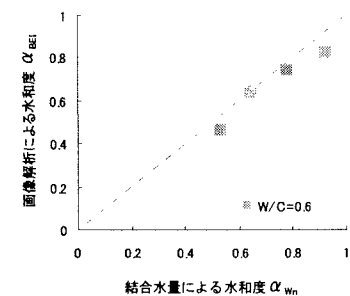


図4 画像解析から求めた水和度 α_{BEI} と結合水量から求めた水和度 α_{Wn} の関係(観察倍率200倍)