

# 論文 画像解析による硬化コンクリートの配合推定

池崎 由典\*<sup>1</sup>・五十嵐 心一\*<sup>2</sup>・川村 満紀\*<sup>3</sup>

**要旨:** コンクリート断面の研磨面に対して、観察倍率を変化させて取得した像の画像解析を行い、骨材粒子および未水和セメント粒子の体積率を求めた。また、水和反応の進行の程度を判断するために結合水量試験を行い、これらの結果からコンクリートの配合を推定した。単位量は骨材体積率の推定結果に影響を受けるが、精度良く推定することが可能であった。また、反射電子像の画像解析と結合水量試験結果を組み合わせることにより、単位量の推定を経ずに硬化コンクリートの水セメント比を直接かつ精度良く求めることが可能であった。

**キーワード:** 画像解析, 配合推定, 水セメント比, 反射電子像

## 1. 序論

コンクリートの強度や耐久性などの性能を決定するうえで、水セメント比は非常に重要な因子である。そのため、実際に打設されたコンクリートの水セメント比を推定することは、コンクリートの品質管理の観点だけでなく、コンクリート構造物の耐久性を診断する際の劣化の原因や以後の維持管理計画を定める上でも有用である。

コンクリートの水セメント比を推定する手法として、フレッシュコンクリートにおいては、JIS A 1112「まだ固まらないコンクリートの洗い分析試験方法」、ウェットスクリーニングしたモルタルをマイクロ波で加熱乾燥する方法<sup>1)</sup>、空気量と単位容積質量の測定結果を用いる方法<sup>1)</sup>、減圧乾燥により測定した乾燥水量から推定する方法<sup>2)</sup>など、種々の試験方法が提案されている。

一方、硬化コンクリートに関しては、単位セメント量の推定を初めに行い、単位量を求めてから水セメント比を推定する方法が一般的である。しかし、単位水量に関しては、単位容積質量から他の単位量を差し引いた残分とする方法をとるため、推定精度に問題があることが指摘されている<sup>3)</sup>。このことは、我が国における一般

的な配合推定方法であるセメント協会法<sup>4)</sup>にもあてはまる。また、セメント協会法は石灰石骨材に適用できないという問題を有し、これを解決するためにフッ化水素酸により処理する手法<sup>5)</sup>やグルコン酸ナトリウムを用いる手法<sup>5), 6)</sup>など様々な手法が提案されている。しかし、これらの手法も単位量を求めてから水セメント比を推定しているため、硬化コンクリートにおいて簡便かつ精度良く水セメント比を直接推定する手法の開発が望まれている<sup>3)</sup>。

本研究では、コンクリート研磨面におけるセメントペーストマトリックスの反射電子像が、残存する未水和セメント体積率に関して定量的な情報を与えるという特長に着目し、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡(反射電子像)観察結果の画像解析と結合水量試験結果から硬化コンクリートの水セメント比およびコンクリート配合における単位量を推定する方法について検討する。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は石川県手取川産の川砂、川砂利(表乾密度はいずれも  $2.57\text{g/cm}^3$ 、吸水率:粗骨材 2.73% 細

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境基盤工学専攻 (正会員)

\*2 金沢大学 大学院自然科学研究科 助教授 博(工) (正会員)

\*3 金沢大学 工学部土木建設工学科 教授 工博 (正会員)

骨材 2.29%) を使用した。  
 また、結合水量の補正用に JIS R5202 に準拠し強熱減量を測定した(細骨材 1.6%)。粗骨材の最大寸法は 20mm および 10mm である。コンクリートの配合を表-1 に示す。供試体は、91 日間 (W/C=50%の試料は 28 日間)の 20°C の水中養生を行った後、実験室内に放置した。

## 2.2 骨材の分析方法

### (1) 粗骨材量の推定方法

コンクリート円柱供試体(φ 100mm×200mm) から厚さ 10mm 程度の板状試料を切り出した。試料の表面を研磨し、断面にフェノールフタレイン溶液を塗布し、骨材とセメントペーストマトリックス相の識別が容易になるようにした。その後、デジタルカメラを用いて倍率 2~5 倍程度で断面の任意の箇所を 10 箇所程度撮影し、画像解析を行った。解析手順としては、それぞれの画像に対して骨材部分が抽出されるように明度および色度に関して適当な閾値を設定し、これが目視判断と一致するようにして 2 値化を行った。その後、絶対最大長(断面の最も長い径)が 5mm 未満の粒子は細骨材である可能性が高いので、その粒子を除去して、残りを粗骨材の面積率として計測した。ここでステレオロジーに基づき計測された面積率は体積率に等しいと仮定し、粗骨材の体積率( $V_G$ (%))とした。単位粗骨材量は粗骨材の体積率と粗骨材の密度から求めた。

### (2) 細骨材量の推定方法

試料は粗骨材の推定と同じ試料を用いた。フェノールフタレイン溶液を塗布した後、光学顕微鏡を用いて倍率 20 倍程度で 10 箇所程度撮影した。このとき、目視により、撮影領域中に粗骨材と思われる骨材が入らないように撮影した。解析方法は粗骨材の場合と同様である。ここで求めた細骨材の体積率( $V'_S$ )は、モルタルマトリックスに占める細骨材の体積率であり、コンク

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	粗骨材の最大寸法(mm)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			水	セメント	粗骨材	細骨材	減水剤
25	10	34	146	581	1086	559	10
50	10	46	214	428	771	900	0
60	10	60	239	398	642	963	0
62	20	44	164	264	1019	799	2.4

リート中の細骨材体積率( $V'_S$ )は粗骨材体積率を用いて式(1)より求めた。単位細骨材量は細骨材の体積率と細骨材の密度から求めた。

$$V'_S = (100 - V_G) V'_S / 100 \quad (1)$$

ここに、 $V'_S$  は細骨材体積率(%),  $V'_S$  はモルタル中の細骨材体積率(% )である。

## 2.3 水セメント比の推定方法

### (1) 結合水量試験

コンクリート供試体中央部から高さ 30mm 程度の円盤を切り出し、この試料の高さを計測し体積を求めた。この試料を破碎して、粗骨材を取り除いてから、105°C の炉乾燥を行った。乾燥後 24 時間にて炉から取り出し、このモルタル試料全体の質量を測定した。その後、鋼鉄製乳鉢等を用いて微粉碎した。式(2)および式(3)を用いてモルタル中の細骨材質量を求め、式(4)よりモルタル中の細骨材の質量比を求めた。

$$v_m = v(1 - V_G / 100) \quad (2)$$

$$M_S = v_m V'_S \rho_S / 100 \quad (3)$$

$$\gamma = M_S / M \quad (4)$$

ここに、 $v_m$  はモルタルの体積(cm<sup>3</sup>),  $v$  はコンクリート試料の体積(cm<sup>3</sup>),  $M_S$  はモルタル中の細骨材質量(g),  $\rho_S$  は細骨材の密度(g/cm<sup>3</sup>),  $\gamma$  は微粉碎試料中の細骨材質量比,  $M$  は微粉碎試料の質量(g)である。

粉碎後の試料を用いて、1050°C まで加熱し、加熱前後の試料質量と加熱による減少量を測定した。この結果に対して、細骨材の強熱減量に

よる質量減少を補正し、セメントペースト中の結合水量とした。

$$M_{LOI} = M_{int} - M_l \quad (5)$$

$$W'_{ne} = M_{LOI} - \gamma M_{int} S_{LOI} / 100 \quad (6)$$

$$W_{ne} = W'_{ne} / M_l (1 - \gamma) \quad (7)$$

ここに、 $M_{LOI}$  は強熱による減少量(g)、 $M_{int}$  は強熱前の試料質量(g)、 $M_l$  は強熱後の試料質量(g)、 $W'_{ne}$  はセメントの結合水量(g)、 $W_{ne}$  はセメントの結合水率、 $S_{LOI}$  は細骨材の強熱減量(%)である。

これらの結果に対して式(8)から水合度( $\alpha$ )を求めた<sup>7)</sup>。

$$\alpha = W_{ne} / 0.23 \quad (8)$$

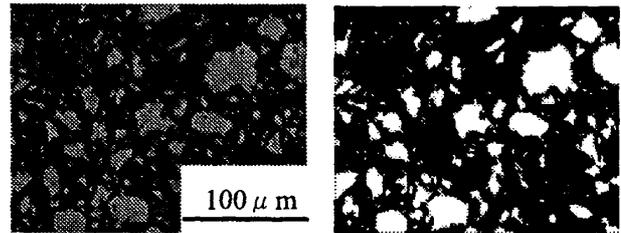
## (2) 反射電子像の画像解析

反射電子像観察用の試料は、コンクリート供試体中央部からモルタル部分を含むようにして、一辺 10mm 四方を切り出し、エポキシ樹脂を含浸させた後、表面を耐水性研磨紙およびダイヤモンドスラリーを用いて研磨し、金-パラジウム蒸着を行った。

走査型電子顕微鏡を用いて、観察倍率 500 倍にて反射電子像をコンピュータに取り込んだ。撮影画像は、セメントペースト中であり、10 箇所程度の画像を取り込んだ。1 画像は 1148×1000 画素からなり、1 画素は約 0.22×0.22 μm に相当する。取り込んだ画像に対して、未水和セメント粒子を抽出するようにグレーレベル閾値を設定し、これが目視判断と一致するようにして二値化を行い、面積率を計測し、これをステレオロジーに基づき未水和セメント体積率とした。図-1に、反射電子像と、未水和セメントに関する抽出を行った二値化した画像を示す。

## (3) 水セメント比の推定

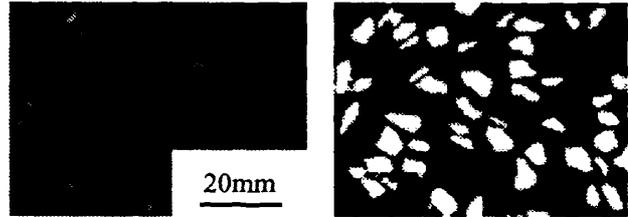
反射電子像の画像解析により計測した未水和セメント体積率および結合水量試験から求めた水合度を用いて、式(9)と式(10)により水セメント比を求めた。



(a) 反射電子像

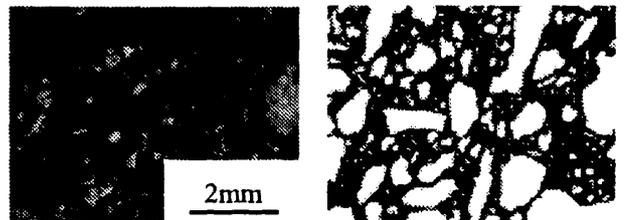
(b) (a) の 2 値化像

図-1 反射電子像と未水和セメントの 2 値化像



(a) 粗骨材の表面画像

(b) 粗骨材の 2 値化像



(c) 細骨材の表面画像

(d) 細骨材の 2 値化像

図-2 試料表面画像と骨材の 2 値化像

$$V_{C.int} = V_{C.uh} / (1 - \alpha) \quad (9)$$

$$W/C = \frac{(100 - V_{C.int}) \rho_w}{V_{C.int} \rho_c} \times 100 \quad (10)$$

ここに、 $V_{C.int}$  は練り混ぜ直後のセメント体積率(%),  $V_{C.uh}$  は画像解析により計測した未水和セメント体積率(%),  $\rho_w$  は水の密度(g/cm<sup>3</sup>),  $\rho_c$  はセメントの密度(g/cm<sup>3</sup>)である。

## (4) 単位セメント量の推定

単位セメント量は、コンクリート中の粗骨材体積率、細骨材体積率および未水和セメント体積率から式(11)により求めた。

$$C = (100 - V_{air} - V_G - V_S) \frac{\rho_c V_C}{100} \times 1000 \quad (11)$$

ここに、 $C$  は単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>),  $V_{air}$  は空気量(%),  $V_C$  はセメントペースト中のセメント体積率(% )である。

## (5) 単位水量の推定

単位水量は、単位セメント量と水セメント比

の推定結果から求めた。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 骨材体積率の推定

図-2は粗骨材および細骨材体積率の推定に用いた画像と骨材抽出後の2値化画像である。これらの図から、骨材には様々な色のものが存在し、骨材自体の色度や明度を基にして、骨材を抽出することは容易ではないが<sup>8)</sup>、フェノールフタレイン溶液を塗布することでセメントペーストマトリックスを抽出して画像演算を行うことで、どの色の骨材も抽出できることがわかる。

骨材体積率の推定結果を表-2に示す。粗骨材の解析領域は約4000mm<sup>2</sup>である。粗骨材に関しては、示方配合の値と最も誤差の大きい結果でも、その差はわずかに1.6%である。河合ら<sup>3)</sup>は粗骨材を写し取って画像解析を行うという手法を用い、誤差が1~3%以内の高い精度での推定が可能であることを報告しているが、本手法も精度は比較的高いものであると言える。細骨材に関しては、示方配合の値と最も誤差の大きい結果はW/C=25%の配合であり、その差は1.0%である。また、粗骨材の結果と比較しても非常に良好な結果が得られている。しかし、細骨材の体積率を推定する場合、式(1)に示したように、粗骨材体積率の推定結果を用いて計算していることから、粗骨材体積率を精度良く推定することが前提となっていることに留意しなければならない。

表-3は最大骨材寸法10mmの粗骨材を使用したコンクリートの解析領域の面積の相違による推定結果の変化を示したものである。ここで、解析領域面積6500mm<sup>2</sup>、4500mm<sup>2</sup>、2500mm<sup>2</sup>、1000mm<sup>2</sup>はφ100mmの円柱供試体断面における全断面積の1/1、1/2、1/4、1/6に相当する。最大骨材寸法10mmにおいては、1/4断面の結果が最も精度が高く、変動も小さいことがわかる。さらに、1/2、1/6断面でも比較的良好な結果が得られている。しかし、全断面の結果において、若干精度が低下し、変動も大きくなっている。こ

表-2 骨材体積率の推定結果

W/C (%)	推定値と示方配合	粗骨材体積率(%)	細骨材体積率(%)
25	推定値	42.9	20.8
	示方配合	42.3	21.8
50	推定値	28.4	35.4
	示方配合	30.0	35.0
60	推定値	24.0	37.8
	示方配合	25.0	37.5
62	推定値	37.7	30.0
	示方配合	39.2	30.7

表-3 粗骨材体積率の解析領域による相違

(W/C=60% G<sub>max</sub>=10mm)

解析領域面積 (mm <sup>2</sup> )	体積率 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)	95%信頼区間(%)
6500	22.9	1.71	7.5	22.9±1.2
4000	24.1	1.24	5.2	24.1±0.9
2500	25.0	1.31	5.2	25.0±0.6
1000	25.1	1.40	5.6	25.1±1.0

表-4 粗骨材体積率の解析領域による相違

(W/C=0.62 G<sub>max</sub>=20mm)

解析領域面積 (mm <sup>2</sup> )	体積率 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)	95%信頼区間(%)
6500	38.4	1.07	2.8	38.4±0.9
4000	37.7	1.46	3.9	37.7±0.9
2500	35.1	5.03	14.3	35.1±3.0

表-5 単位骨材量の推定結果

W/C (%)	推定値と示方配合	単位粗骨材量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位細骨材量 (kg/m <sup>3</sup> )
25	推定値	1103	535
	示方配合	1086	559
50	推定値	730	910
	示方配合	771	900
60	推定値	617	971
	示方配合	642	963
62	推定値	969	771
	示方配合	1019	799

れは、領域面積を大きく採ることにより、比較的小さい粗骨材粒子を適切に抽出することができなかつたためと考えられる。また、全断面を撮影すると、空隙などの欠陥部分も画像に含まれるため、これを除去する過程において誤差を生じたことが考えられる。

表-4は最大骨材寸法 20mm の粗骨材を使用したコンクリートの解析領域の面積の相違による推定結果の変化を示したものである。この場合、全断面の結果が最も精度が高く、変動も小さい。1/2 断面の結果は、変動は小さいが、精度はそれほど高くない。しかし、1/4 断面の結果は、変動も大きく、精度も低い結果となった。最大骨材寸法 10mm の場合では最も精度の高かった 1/4 断面の結果が最も精度が低くなった理由としては、骨材寸法が大きくなったことにより系を代表する領域寸法が大きくなるのに対して、1/4 断面では、その断面積が小さすぎたためと考えられる。

表-5に単位骨材量の推定結果を示す。骨材の密度は、使用した骨材の密度(2.57g/cm<sup>3</sup>)を用いた<sup>4)</sup>。粗骨材については、ほとんどの結果における示方配合との差は 40kg/m<sup>3</sup> 以内で、誤差は約 5%以内であり、推定精度は高いといえる。

細骨材の場合でも、ほとんどの結果において 40kg/m<sup>3</sup> 以内に収まっており、粗骨材の結果と同様の範囲内であることが確認できる。よって、光学顕微鏡を用いて細骨材の体積率を推定する手法も、高い精度を有していると考えられる。

### 3.2 水セメント比等の推定結果

表-6に試料採取時の材齢、結合水量試験結果から求めた水和水および未水とセメント体積率の結果を示す。ここで、結合水量試験は、4つの円盤試料から採取した試料による結果を平均したものである。最も材齢が経過した W/C=60% の水和水度が最も高くなっていることがわかる。

図-3は水セメント比の推定結果を示したものである。W/C=50%では 4%程度の誤差が生じているが、W/C=25%および 60%では、その誤差は ±2%以内に収まっている。この結果は、現在最

表-6 水和水と未水とセメント体積率の結果

W/C (%)	試料採取時の材齢(日)	推定水和水 (%)	未水とセメント体積率(%)
25	180	57.6	23.7
50	30	84.0	6.6
60	360	89.7	3.6

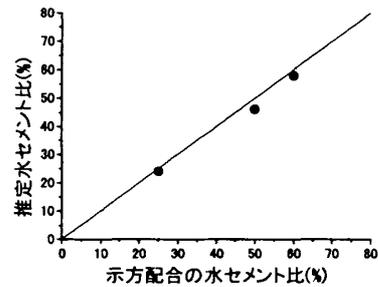


図-3 水セメント比の推定結果

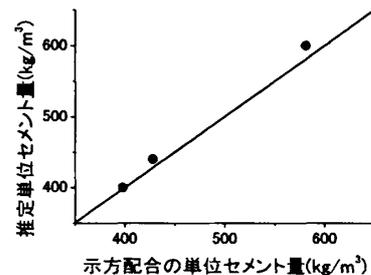


図-4 単位セメント量の推定結果

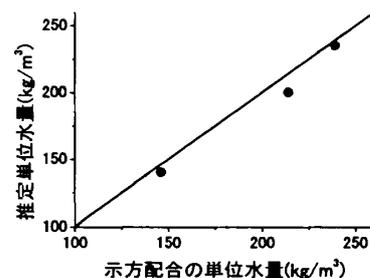


図-5 単位水量の推定結果

も高精度での推定が可能である蛍光顕微鏡による薄片試料観察<sup>9)</sup>で得られる精度、±2.5%と同程度であり、水セメント比推定の精度は高いものであると言える。

図-4は単位セメント量の推定結果を示したものである。ここで、単位量を求めるために、最大骨材寸法が 10mm であることを考慮して、エントラップトエアが 3%存在するものとした

<sup>10)</sup>。いずれの結果においても示方配合の単位セメント量に比べて、若干大きな結果となっているが、その差は中田ら<sup>11)</sup>が示している±10%という配合推定における目標値をほぼ満足する結果となっている。

図-5は単位水量の推定結果を示したものである。W/C=50%の結果では誤差がやや大きいものの、それ以外では精度の高い結果が得られていることがわかる。また、単位水量は、水セメント比の推定結果と同様の傾向を示しており、水セメント比の推定精度によって左右されることがわかる。

以上のことから、観察レベルの異なる画像の画像解析を援用することにより硬化コンクリートの水セメント比や単位量を推定することは十分可能であると考えられる。特に、水セメント比の推定においては、単位量の推定を行わずに求めることが可能であり、このことはコンクリートの耐久性評価を行う際に非常に有用であると考えられる。

#### 4. 結論

- (1) フェノールフタレイン溶液を用いて、セメントペーストマトリックスを着色することで、骨材との間に色度差を生じさせることにより、コンクリート表面画像から骨材体積率を計測することが可能となる。
- (2) 適切な解析領域を選択することで、高い精度で骨材体積率の推定が可能となる。
- (3) 結合水量試験により水和度を求めることが可能であり、これを反射電子像の画像解析により求められる未水とセメント体積率と組み合わせることにより、単位量を求めることなく、直接水セメント比を推定できる。

#### 参考文献

- 1) 森濱和正, 高橋弘人: 種々のフレッシュコンクリートの品質判定法に関する比較, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.159-164, 1989.6

- 2) 中村博之ほか: 減圧乾燥方法を用いたフレッシュコンクリートの単位水量・水セメント比の推定について, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.349-354, 2000
- 3) 河合研至, 小林一輔: 硬化コンクリートの単位セメント量の推定に関する研究, 土木学会論文集, 第402号/V-10, pp.145-150, 1989.2
- 4) セメント協会: コンクリート専門委員会報告 F-18 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験結果, 1967
- 5) 吉田八郎ほか: 石灰石骨材を使用した硬化コンクリート中のセメント量推定試験方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.347-352, 1990
- 6) 笠井芳夫ほか: 石灰石骨材コンクリートにも適用できる簡易なセメント量判定試験方法, セメント・コンクリート, No.572, pp.16-23, 1994.10
- 7) Powers, T.C: Physical properties of cement paste, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on the Chemistry of Cement, Vol.1, pp.577-613, 1960
- 8) Yang, R. and Buenfeld, N.R.: Binary segmentation of aggregate in SEM image analysis of concrete, Cement and Concrete Research, Vol.31, No.3, pp.437-441, 2001
- 9) Liu, J.J. et. al: Comparison of Known and Determined Water-Cement Ratios Using Petrography, Water Cement Ratio and Other Durability Parameters Techniques for Determination, (Editor Khan, M.S.), ACI SP-191, pp.11-26, 2000
- 10) 社団法人 日本材料学会: 建設材料実験第4版, 1978
- 11) 中田善久, 笠井芳夫: 「グルコン酸ナトリウムによる硬化コンクリートの単位セメント量試験方法」の概要と NDIS 3422 の制定の経緯, コンクリート工学, Vol.41, No.11, 2003.1