

# 走査型電子顕微鏡の反射電子像からコンクリートの水セメント比と強度を推定する方法

## Method of Estimating the Mix Proportions and the Compressive Strength of Concrete Using the SEM-BEI of the Cement Paste

里山 公治 全 振 煥  
閑田 徹志 名 和 豊 春<sup>1)</sup>

### 要 約

構造体コンクリートのコア圧縮強度が異常に低い値を示す場合があるが、セメントペーストに占める水和生成物量と毛管空隙量から推定される強度との対比で試験値の妥当性を評価できることを Powers と Brownyard は示唆している。本研究では Powers と Brownyard のモデルにより水セメント比、水和率、ゲル空間比および強度を推定するため、走査型電子顕微鏡下で取得したセメントペーストの反射電子像から毛管空隙、水和生成物、未水和セメントの体積率を定量化する方法を考案した。実験室で作製した試験体と実構造物から採取したコンクリートに適用した実験結果を報告する。

### 目 次

- I. はじめに
- II. セメントペースト組織のモデル
- III. BEI の画像解析
- IV. 実 験
- V. おわりに

#### I. はじめに

構造体コンクリートの圧縮強度は、力学的特性や耐久性に関与するため、維持管理や耐震診断における重要な調査項目となっている。ボーリングで採取したコアの圧縮強度は最も信頼性が高いとされているが、コアはボーリングによる損傷、経年による欠陥などの影響を含む可能性がある。圧縮強度の試験結果が異常値となった場合、建設時の調査、施工、養生、供用中の履歴に関する情報が不十分なこともあり、異常値の原因が明らかにできない場合がある。

このような構造体コンクリートについて、水セメント比、ゲル空間比、水和率および推定強度が圧縮強度試験値の説明情報となる。

Powers と Brownyard は、コンクリートの圧縮強度 $F_c$ とゲル空間比 $X$ （未水和セメントを除くセメントペーストの体積に占める水和生成物体積の割合）を下式で関係づけた<sup>1) 2)</sup>。

$$F_c = F_c^0 X^n \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

- $F_c^0$  : セメントの性質に関する定数
- $X$  : ゲル空間比
- $n$  : 定数

また、硬化セメントペーストの水和組織を Fig.1 に示す未反応水

(W)、未水和セメント (AH)、水和生成物(HP)、化学収縮(S)で構成し (以下、Powers モデル)、水和生成物体積( $V_{HP}$ )および化学収縮体積( $V_S$ )の水和前のセメント体積( $V_c = V_{C0} - V_{AH}$ )に対する比( $V_{HP}/V_c$ ,  $V_S/V_c$ )がクリンカ鉱物組成で決まる定数となることを示した。<sup>1) 2)</sup>

このモデルによると、クリンカ鉱物組成が分かっているとき、未水和セメント体積( $V_{AH}$ )、水和生成物体積( $V_{HP}$ )、未反応水体積( $V_W$ )を定量すれば、水セメント比( $W_0/C_0$ )、水和率( $1 - V_{AH}/V_{C0}$ )、ゲル空間比( $V_{HP}/(1 - V_{AH})$ )および圧縮強度の推定が可能となる。

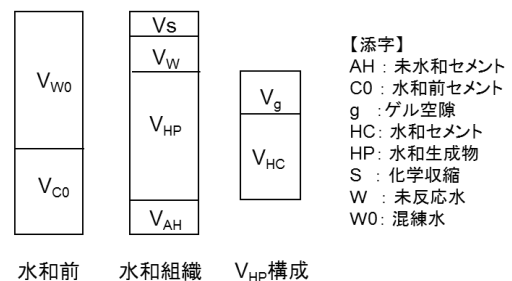


Fig.1 セメントペースト中の主要相の体積組成  
(The Volumetric Proportions of the Main Components in Cement Paste)

そこで、本研究では、Fig.2 に示す画像解析法、計算法の開発を目指した。未反応水は毛管空隙(CP)として定量している。

実験室で作製した水とセメントだけの混練物 (以下、純ペーストと呼ぶ) およびコンクリートのセメントペーストの走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) の反射電子像 (BEI: Backscattered Electron Imaging) から Powers モデルの  $V_{AH}$ ,  $V_{HP}$ ,  $V_W$  を定量する方法を決定し、水セメント比および強度を推定し、実

1) 北海道大学 Hokkaido University

**キーワード** : 走査型電子顕微鏡, 反射電子像, 水セメント比, ゲル空間比, 水和率, 空隙率, 圧縮強度

**Keywords** : scanning electron microscope, backscattered electron image, water-cement ratio, gel space ratio, degree of hydration, porosity, compressive strength

際の水セメント比および実強度と比較することにより画像解析，計算の妥当性を検討した。この手法を用いて，実構造物から採取したコンクリートの推定強度とコア圧縮強度の相関を検討した。反射電子像は観察位置の平均原子量が高いほど明るくなるため，画像のグレースケールから物質を推定することができる。

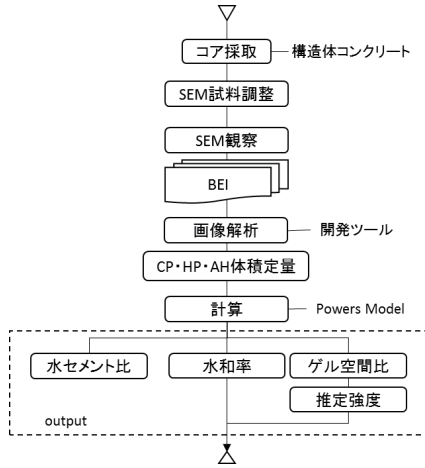


Fig.2 研究成果の活用イメージ (Application Image of the Results of Research)

II. セメントペースト組織のモデル

1. Powers モデル<sup>1) 2)</sup>

ポルトランドセメントの主要水和生成物である C-S-H ゲルは Fig.3 のモデルで説明されている<sup>3)</sup>。大きな表面積をもつコロイド状の C-S-H 層に水の単分子層 (モノレイヤ水) が吸着し，C-S-H 層の間隙(ゲル間隙)に蒸発性の水 (ゲル水) が保持されている。C-S-H 層には化学結合水が含まれる。

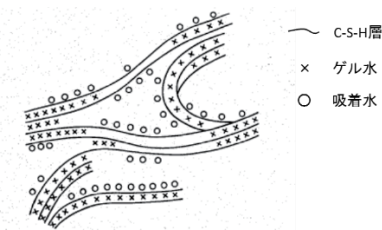


Fig.3 C-S-H ゲルの Feldman-Sereda モデル<sup>3)</sup> (Feldman-Sereda Model of the Structure of the C-S-H Gel of Portland Cement Paste. After Ramachandran et al.)

化学結合水体積を  $V_{Wn}$  とすると Fig.1 より下式が成り立つ。

$$V_{HP} = V_{HC} + V_g = V_C + V_{Wn} + V_g \dots \dots \dots (2)$$

単位セメント質量当たりの化学結合水質量 ( $w_n$ ) とモノレイヤ水質量 ( $w_m$ ) はクリンカ鉱物組成 ( $x_{C3S}$ ,  $x_{C2S}$ ,  $x_{C3A}$ ,  $x_{C4AF}$ ) で決まる定数  $a$ ,  $b$  で与えられる。

$$a = w_n/c = 0.187x_{C3S} + 0.158x_{C2S} + 0.665x_{C3A} + 0.213x_{C4AF} \dots (3)$$

$$b = w_m/w_n = 0.230x_{C3S} + 0.320x_{C2S} + 0.317x_{C3A} + 0.368x_{C4AF} \dots (4)$$

Powers と Brownyard は，ゲル水質量 ( $w_g$ ) とモノレイヤ水質量

( $w_m$ ) に一定の関係 ( $w_g = 4 w_m$ ) を見出し，また，化学結合水の比体積 ( $v_n = 0.72 \text{ cm}^3/\text{g}$ )，ゲル水の比体積 ( $v_g = 0.90 \text{ cm}^3/\text{g}$ ) に一定値を与えている。セメントの比体積を  $v_c$  で表すと，水和によるセメントの体積膨張率  $\delta_v$  はクリンカ鉱物組成で決まる定数で与えられる。

$$\frac{w_g}{c} = \frac{4w_m}{c} = \frac{w_n}{c} \times \frac{4w_m}{w_n} = 4ab \dots \dots \dots (5)$$

$$\delta_v = \frac{V_{HP}}{V_C} = 1 + \frac{w_n v_n}{c v_c} + \frac{w_g v_g}{c v_c} = 1 + \frac{a}{v_c} (v_n + 4b v_g) \dots \dots (6)$$

化学収縮量 ( $V_s$ ) は，水和に消費した自由水の体積と水和生成物中の水の体積の差として計算する。セメントの密度を  $\rho_c$  で表すと， $V_s$  もクリンカ鉱物に特有の下式で計算される定数である。

$$V_s = w_n (v_w - v_n) + w_g (v_w - v_g) = \rho_c V_C \{ a (v_w - v_n) + 4ab (v_w - v_g) \} \dots \dots (7)$$

$$\alpha = a (v_w - v_n) + 4ab (v_w - v_g) \dots \dots \dots (8)$$

とおくと

$$V_s = \alpha \rho_c V_C \dots \dots \dots (9)$$

2. 水セメント比・ゲル空間比・水和率の推定

水和生成物量，化学収縮量はセメントの反応量に比例するので，本研究では，水和進行に伴う組成変化を Fig.4 で想定した。

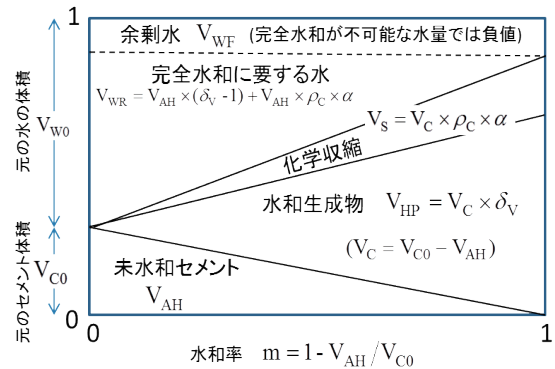


Fig.4 水和反応の進行に伴うセメントペース組成の変化 (The Change of the Cement Paste Composition with the Progress of the Hydration Reaction)

クリンカ鉱物組成を与えると，セメントの体積膨張率  $\delta_v$ ，化学収縮の比例定数  $\alpha$  が式(6)，式(8)から決まる。また，セメント密度  $\rho_c$  が決まる。

$V_{WR}$  は  $V_{AH}$  の測定値を用いて式(10)で計算され， $V_{WF}$  は CP 測定値を  $V_W$  にあてて，式(11)で計算することができる。

$$V_{WR} = V_{AH} \times (\delta_v - 1 + \rho_c \times \alpha) \dots \dots \dots (10)$$

$$V_{WF} = V_W - V_{WR} \dots \dots \dots (11)$$

また，

$$V_{AH} + V_{HP} + V_s + V_{WR} + V_{WF} = V_{C0} \times (\delta_v + \rho_c \times \alpha) + V_{WF} = 1 \dots \dots \dots (12)$$

より

$$\frac{1}{V_{C0}} = \frac{\delta_v + \rho_c \times \alpha}{1 - V_{WF}} \dots \dots \dots (13)$$

であり、水セメント比  $W/C$ 、セメントの水和率  $m$ 、ゲル空間比  $X$  を下式で推定することができる。

$$W/C = \frac{V_{W0} \times \rho_w}{V_{C0} \times \rho_c} = \frac{1 - V_{C0}}{V_{C0}} \times \frac{\rho_w}{\rho_c} = \left( \frac{\delta_V + \rho_c \times \alpha}{1 - V_{WF}} - 1 \right) \times \frac{\rho_w}{\rho_c} \quad (14)$$

$$m = \frac{V_c}{V_{C0}} = 1 - \frac{V_{AH}}{V_{C0}} = 1 - \left( 1 + WC \times \frac{\rho_c}{\rho_w} \right) \times V_{AH} \quad (15)$$

$$X = \frac{V_{HP}}{1 - V_{AH}} = \frac{(V_{C0} - V_{AH}) \times \delta_V}{1 - V_{AH}} \quad (16)$$

本研究では毛管空隙と未水和セメントの体積率を求めて、水セメント比、水和率、ゲル空間比を推定している。

### III. BEI の画像解析

#### 1. BEI からの輝度情報の取得

硬化セメントペーストは、水の占有空間に相当する毛管空隙(CP)、カルシウムシリケート水和物(C-S-H)、水酸化カルシウム結晶体(CH)、未水和セメント(AH)からなる。BEI は観察位置の平均原子量が大きいほど明るくなる特徴があり、観察試料はエポキシ樹脂を含まれているため、エポキシ樹脂を含まない CP、C-S-H、CH、AH の順に、平均原子量が高くなるにつれて BEI は明るくなる<sup>4)</sup>。このため、Fig.5 に示すように、デジタル値の表から BEI のグレースケールの頻度分布(後述の正規化がされている)を作成し CP、C-S-H、CH、AH を分離して、それぞれの面積率を求めた。面積率は、既往の文献<sup>4)</sup>により、体積率に読み替えている。

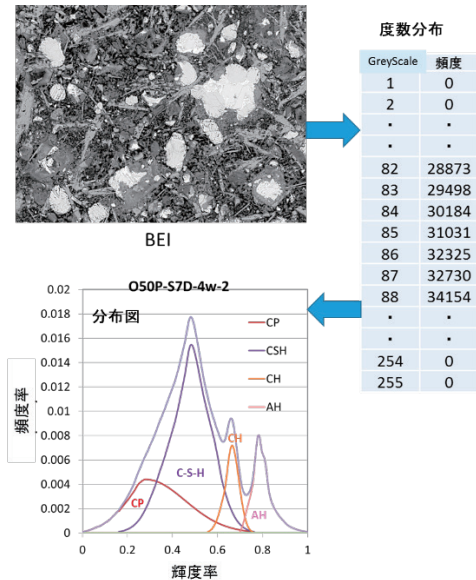


Fig.5 BEI の頻度分布作成の概要 (Summary of the Frequency Distribution Making of BEI)

#### 2. レースケールの正規化

BEI の明るさや画素数は測定条件に影響されるため、下式で輝度率と頻度率を定義し、Fig.6 に示すように、グレースケールと画素数を正規化した。以下、正規化した分布を輝度率分布と呼ぶ。

$$(\text{輝度率}) = \frac{(\text{階調}) - (\text{下限階調})}{(\text{上限階調}) - (\text{下限階調})} \quad (17)$$

$$(\text{頻度率}) = \frac{(\text{画素数})}{(\text{総画素数})} \quad (18)$$

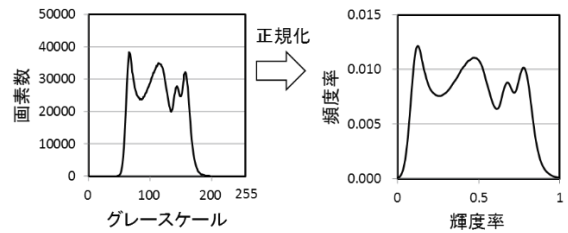


Fig.6 グレースケール分布の正規化 (Normalization of the Pixel Number and the Gray Scale)

#### 3. 輝度率分布からの相分離の概要

CH と AH は密実な粒子であるのに対し、C-S-H はセメント粒子表面を境として内部水和物、外部水和物を生成し、化学組成や密実さが一定ではない<sup>5)</sup>。輝度率分布上の山形は CP と C-S-H の混合相と予想し、混合相から CP 相と C-S-H 相を定量した。なお、水セメント比、水和率、ゲル空間比の計算において CP 相を  $V_w$  にあてており、測定された C-S-H 相は C-S-H ゲルと化学収縮の混在を想定している。

各相の抽出方法を輝度率分布パターンごとに Fig.7 に示す。極大点は傾き；式(19)が正負逆転する点とし、相境界はガウス関数形を仮定して式(20)で線引きしている。AH の極大点が明示されない場合、極大点の輝度率を経験をもとに 0.8 としている。Fig.7 に示すように CP は CP と C-S-H の混合相中で高輝度側に漸減して分布すると仮定している。CP のピークが明示されない Fig.7(a) のパターンに対しては、 $W/C$  が低い状況で C-S-H が成長したと推定しており、混合相左裾から混合相に③線を引き、CP 領域を決めて、残りを C-S-H にあてている。CP ピークより高輝度側に混合相の左裾が下りた Fig.7(b) のパターンは、密実な C-S-H が生成した結果と推定しており、混合相の左裾位置から③線を引いて CP を抽出し、混合相残部から式(20)で C-S-H を抽出後、CP と C-S-H 間の残分は CP に加えている (⑤)。混合相左裾が低輝度に拡大し、CP ピークより低輝度に達する Fig.7(c) (d) のパターンは疎な C-S-H が多く含まれる結果と推定している。CP ピークから③線を引いて CP 抽出後、混合相残部から C-S-H を抽出しているが (④)、CP と C-S-H 間の残部の割り振り方が(c)と(d)で異なっている。(c)では CP 右裾が C-S-H ピークより低輝度側にあるため、CP の抽出不足を考慮して、残部を CP に加えた (c-⑤)。(d)では残部を C-S-H に加え、C-S-H を低輝度側に広げている(d-⑤)。実施例を Fig.8 に示す。

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta x) - f(x-\Delta x)}{2\Delta x} \quad (19)$$

$$g(x) = Y_c \cdot \exp\{a(x - X_c)^2\} \quad (20)$$

$x$ : 輝度率  $f(x)$ : 頻度率  $(X_c, Y_c)$ : 極大点

### IV. 実験

#### 1. 試料と試験条件



(1) 純ペースト

Table 1 に圧縮強度試験および SEM 観察に用いた純ペーストの水セメント比(W/C, 以下, 調合 W/C と呼ぶ), 養生条件, 試験条件を示す。純ペーストは練り混ぜ後の分離を防ぐために, プリーディング水が目視で確認できなくなるまで, 30 分間静置・30 秒間攪拌を 2~3 時間繰り返した。その後, φ5cm×10cm モールドに成形し, 封緘養生した。材齢 7 日, 28 日, 91 日に 12×12×12mm の SEM 観察試料をダイヤモンドカッターで切り出した。エタノールに 24 時間浸漬後, 真空乾燥して水和停止させた後, 低粘度エポキシ樹脂に埋込み, 観察面を研磨, 金蒸着し, 倍率 500 で SEM 観察を実施した。また, 同材齢に圧縮強度試験を行った。

(2) コンクリート

Table 2 に圧縮強度試験および SEM 観察に用いたコンクリートの水セメント比(W/C, 以下, 調合 W/C と呼ぶ), 養生条件, 試験条件を示す。調合は水と粗骨材の単位量を一定とし, セメント量と細骨材量を変えている。材齢 28 日にセメントペーストと同様に 12×12×12mm の SEM 試料を作製し, 倍率 750 で SEM 観察を実施した。同材齢で φ10cm×20cm 試験体の一軸圧縮強度試験を行った。また, W/C 0.5, 0.7 については, 材齢 28 日に水和停止処理後, SEM 観察試料を作製し, 室内に 4 年間静置した試料の SEM 観察も行った。材齢 4 年の圧縮強度試験は実施していない。

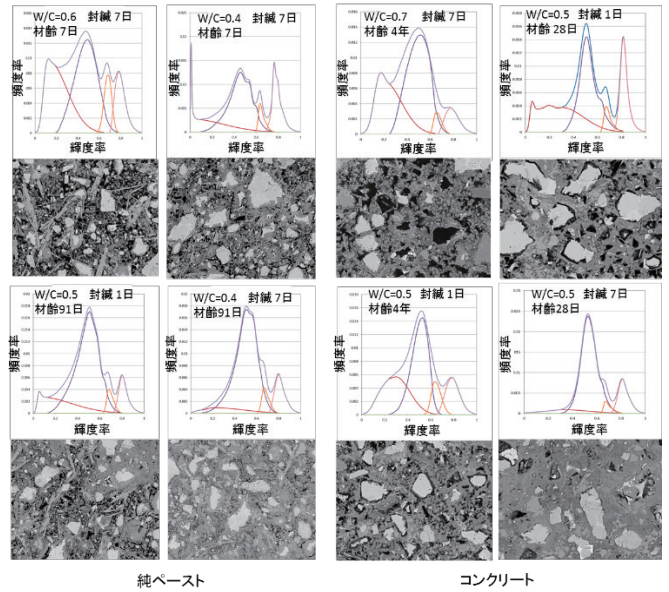


Fig.8 BEI と輝度率分布例  
(Example of the BEI and the Gray Scale Distribution of Cement Paste)

Table 1 純ペーストの水セメント比と養生条件

(The Water-Cement Ratios and the Curing Conditions of the Paste)

W/C	養生条件	試験材齢
0.4	封緘 1 日で脱型後 20°C60%RH で保管 封緘 7 日で脱型後 20°C60%RH で保管	7 日
0.5		28 日
0.6		91 日

強度試験: φ5×10cm SEM 試料: 12×12×12mm<sup>3</sup>  
倍率 500 で観察  
C: 普通ポルトランドセメント

Table 2 コンクリートの調合と養生条件

(The Mixture Proportions and Curing Conditions of Concrete)

W/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				養生条件	試験材齢
	W	C	S	G		
0.7	180	257	879	957	封緘 1 日または 7 日後, 20°C 60%RH	28 日 4 年*1)
0.6		300	842			
0.5		360	799			

強度試験: φ10×20cm SEM 試料: 12×12×12mm<sup>3</sup> 倍率 750 で観察  
\*1) 材齢 28 日に水和停止処理した W/C=0.5, 0.7 の試料を材齢 4 年で SEM 観察のみ実施

W: 水, C: 普通ポルトランドセメント, S: 細骨材, G: 粗骨材

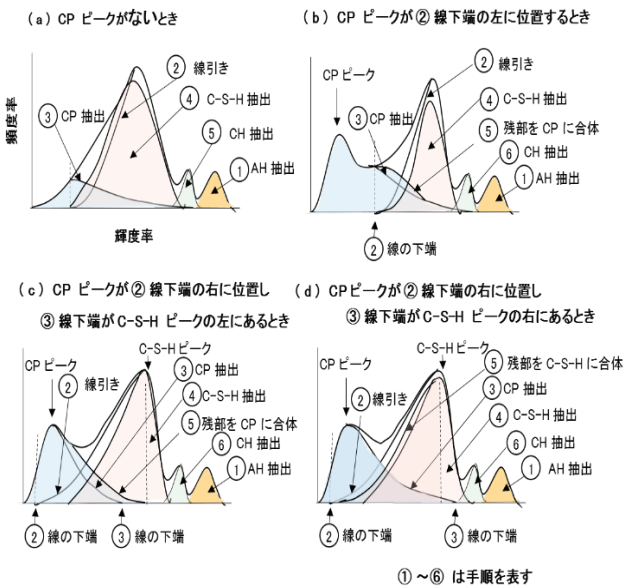


Fig.7 輝度率分布の分割方法 (例)

(Division Method of the Brightness Distribution)

2. 水セメント比の推定結果

(1) 純ペースト

純ペーストの W/C の推定結果を Fig.9 に示す。図中の縦棒は材齢 7 日, 28 日, 91 日に関わらず全ての推定値に正規分布を仮定した 95%信頼区間で平均と平均の 95%信頼区間を付した。n は視野数 (BEI の数) である。調合 W/C 0.4 と 0.6 の平均推定値は調合値に近いのに対し, 調合 W/C 0.5 では, 平均推定値は調合 W/C より 0.05 程度低く, 混練後の水が保持されなかった可能性がある。推定 W/C

のバラつきは, 調合 W/C の増大に伴い大きくなる傾向を示している。

推定 W/C 実験値からカーネル密度推定法により推定した全体分布を Fig.10 に示す。カーネル関数はガウスカーネル式(25)とし, バンド幅 h を式(26)として, カーネル密度を式(27)で与えた。最頻値は Fig.9 の平均と同等で分布の幅は W/C の増加に伴い広がり, 材料が不均一化する傾向を示している。

Fig.9, Fig.10 より, 推定 W/C の平均値で調合 W/C を概ね推定できることを確認した。

$$K(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad \dots \dots \dots (25)$$

$$h = \frac{0.9\sigma}{n^{0.2}} \quad \dots \dots \dots (26)$$

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad \dots \dots \dots (27)$$

ここで、

n : データ総数    σ : 測定値の標準偏差

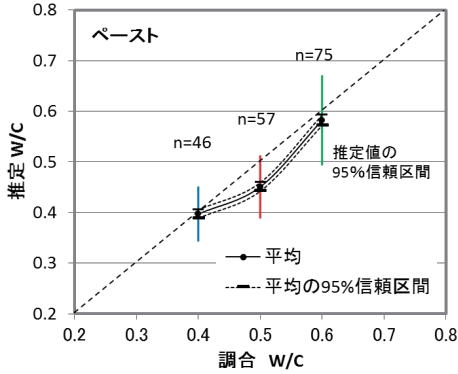


Fig.9 純ペーストの推定水セメント比  
(The Estimated Water Cement Ratio in the Paste)

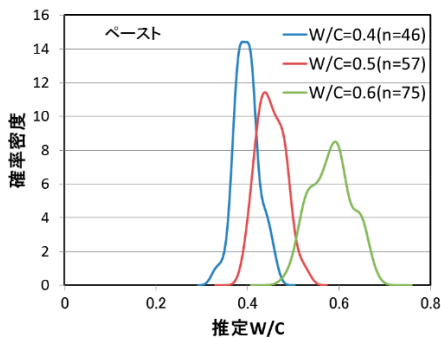


Fig.10 純ペーストの推定水セメント比の分布  
(The Water Cement Ratio Distribution of the Paste)

(2) コンクリート

コンクリートの W/C の推定結果を Fig.11 に示す。調査 W/C=0.5 の平均推定値は調査 W/C と同等であるが、調査 W/C が高いほど乖離が広がり、調査 W/C 0.6 の平均推定値は 0.55、0.7 の平均推定値は 0.63 程度となった。この傾向は W/C が高いほどブリーディングが多くなったことによると推定される。また、推定 W/C のバラつきは、調査 W/C が増加すると大きくなる傾向がみられる。

推定 W/C の全体分布の推定結果を Fig.12 に示す。W/C の下限は調査 W/C に依らず同等であるが、分布の右裾は調査 W/C が高いほど高 W/C 側に広がり、材料が不均一化している。最頻値は、右に伸びる分布形状の影響を受けて、平均より低い。

Fig.11, Fig.12 より、ブリーディングの影響を考慮すれば、推定 W/C の平均値で調査 W/C を概ね推定できることが確認された。

(3) まとめ

純ペーストとコンクリートの W/C 推定結果は以下のようである。

- ①推定 W/C の平均値で実調査の平均値を概ね推定できる。
- ②高 W/C では推定 W/C はブリーディングの影響を受けるようである。
- ③W/C が高いほど試料中の W/C のバラつきが大きくなり不均一化する様相が見られた。
- ④概ね W/C は良好に推定されており、輝度率分布の分割方法、Powers モデルの採用は妥当なものと考えられる。

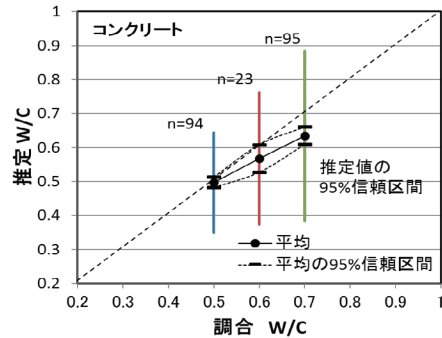


Fig.11 コンクリートの推定水セメント比  
(The Estimated Water Cement Ratio in the Concrete)

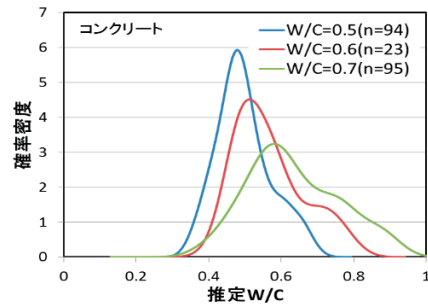


Fig.12 コンクリートの推定水セメント比の分布  
(The Water Cement Ratio Distribution of the Concrete)

3. 水和率の推定結果

(1) 純ペースト

純ペーストの推定水和率の材齢に伴う変化を、調査 W/C および封緘養生期間ごとに Fig.13 に示す。

推定水和率は材齢および封緘養生の長期化とともに増加する傾向を示すが、W/C 0.4 では材齢 4 週以降の水和は抑制され、W/C 0.5 では材齢 4 週以降の水和速度が低下し、W/C=0.6 では一定速度で水和が進行している。水が多いほど水和率が高く推定されている。

(2) コンクリート

封緘養生期間(1日または7日)による推定水和率の変化を Fig.14 に示す。コンクリート試料は全て材齢 28 日に水和停止処理後、観察試料に加工したものである。W/C 0.5 と 0.7 については試料面を室内に 4 年間開放状態で静置した試料の測定結果も併記した。

W/C 0.6 では封緘養生 1 日と 7 日の平均水和率に差がないが、W/C 0.5, 0.7 では封緘養生期間 7 日の水和率が 1 日より高い。

W/C 0.7 では、材齢 28 日の水和停止処理後も、4 年間の室内静置で水和が進行しており、大気の水分子が水和に寄与したことを示す結果となった。W/C 0.7 は透気・透湿性が W/C 0.5 より大きいことを示している。

(3) まとめ

平均推定水和率は次の傾向を示した。

- ① 材齢の長期化で水和率が増加する。
- ② 封緘養生の長期化で水和率が増加する。
- ③ W/C が低くなると水和が停滞する（純ペースト）
- ④ 透気性が水和の継続に影響すると考えられる（材齢4年のコンクリート）。
- ⑤ 推定水和率は実際の水和挙動を反映している。

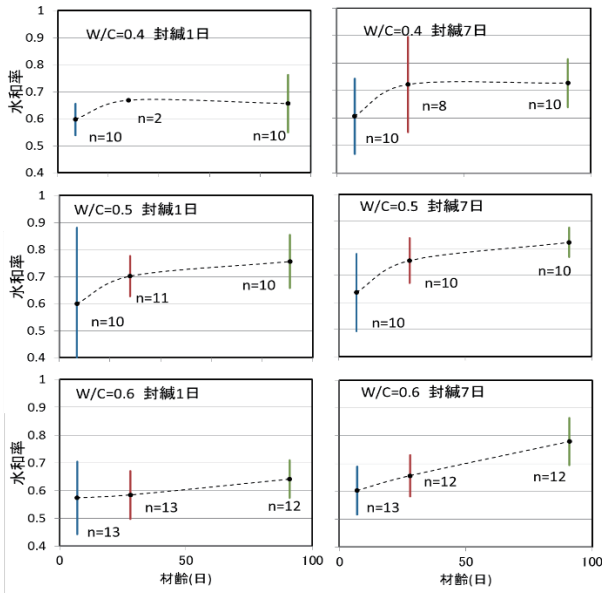


Fig.13 純ペーストの推定水和率

(The Reaction Rate of Cement in the Paste Specimen)

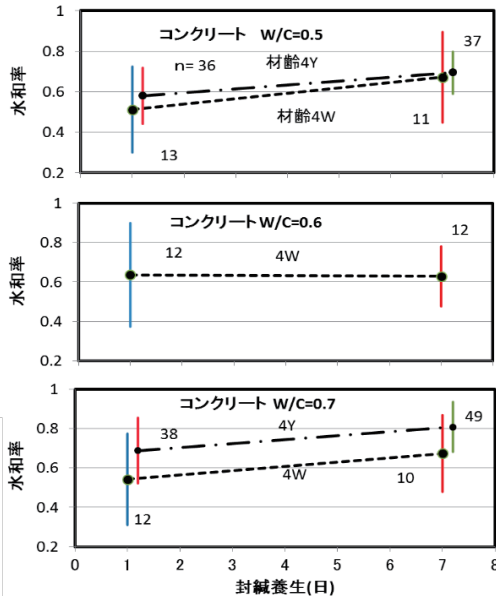


Fig.14 コンクリートの推定水和率

(The Reaction Rate of Cement in the Concrete Specimen)

4. ゲル空間比の推定結果と圧縮強度の関係

(1) 純ペースト

純ペーストのゲル空間比の材齢に伴う変化を、調査 W/C および封緘養生期間ごとに Fig.15 に示す。推定ゲル空間比は、W/C=0.4 で材齢 4 週以降に停滞しているが、材齢に伴い増加傾向を示し、同材齢では W/C が高いほど低くなっている。

圧縮強度と平均ゲル空間比およびその 95%信頼限界の関係を Fig.16 に示す。Powers 形の近似式の寄与率は 95%信頼上限 (0.66)、平均値 (0.78)、95%信頼下限(0.84)の順に大きい。ゲル空間比が 0.7 程度を超えると圧縮強度が Powers 形の近似式値を超える傾向があり、Powers 形の近似式に適用限界がみられた。

(2) コンクリート

コンクリートの推定ゲル空間比の封緘養生(1日および7日)による相違を Fig.17 に示す。ゲル空間比は封緘養生が長いほど増加し、材齢 4 週と比較すると、W/C ほど低いほどゲル空間比は大きい。W/C 0.7 では、材齢 28 日の水和停止処理後も 4 年間の室内静置でゲル空間比が増加している。

コンクリートの圧縮強度と平均ゲル空間比およびその 95%信頼限界のプロットを Fig.18 に示す。Powers 形の近似式の寄与率は 95%信頼上限 (0.75)、平均値 (0.84)、95%信頼下限(0.91)の順に大きく、ペーストと同様の傾向を示した。95%信頼下限の寄与率が最大であるが、計算の簡便と寄与率の高さから実施上は平均ゲル空間比で圧縮強度の推定が可能と考えられる。

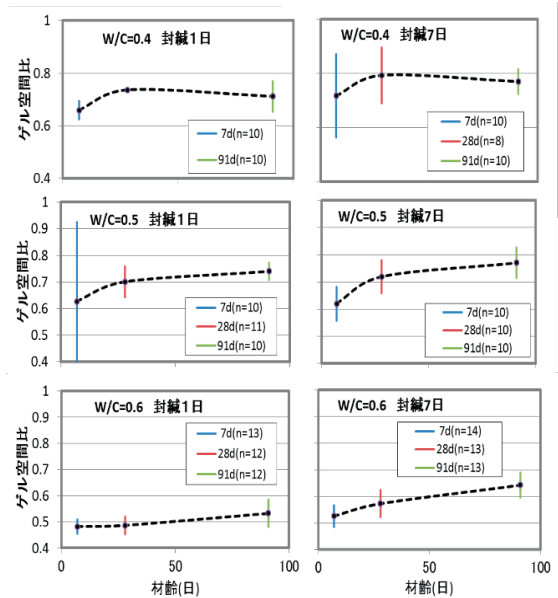


Fig.15 純ペーストの推定ゲル空間比

(The Estimated Gel Space Ratio of the Paste)

(3) まとめ

平均推定ゲル空間比は次の傾向を示した。

- ① 材齢の長期化でゲル空間比が増加する。
- ② 封緘養生の長期化でゲル空間比が増加する。
- ③ W/C が低いほどゲル空間比は大きい。
- ④ ゲル空間比は実際の水和挙動を反映している。
- ⑤ 圧縮強度と平均推定ゲル空間比は Powers 形の式で関係する。
- ⑥ ただし、純ペーストの圧縮強度に対してはゲル空間比 0.7 程度以上で Powers 形の近似式が適用できない。

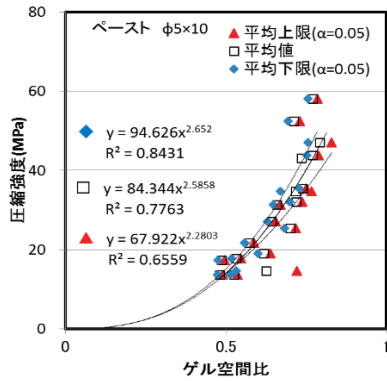


Fig.16 純ペーストの強度とゲル空間比の関係  
(Compressive Strength and Gel-Space Ratio of the Paste)

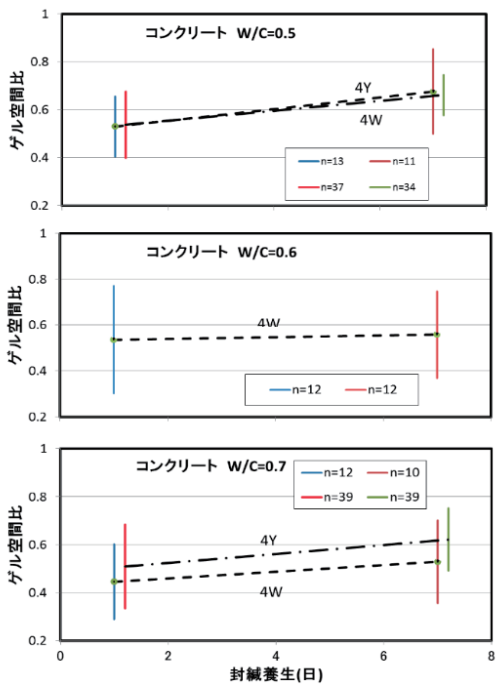


Fig.17 コンクリートの推定ゲル空間比  
(The Estimated Gel Space Ratio of the Concrete)

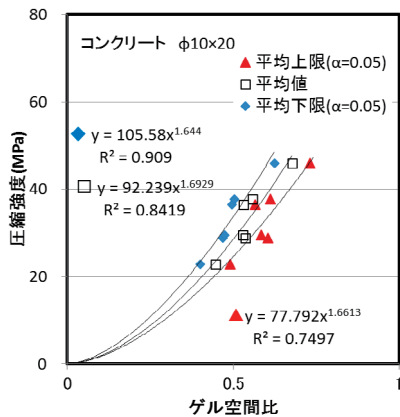


Fig.18 コンクリートの強度とゲル空間比の関係  
(Compressive Strength and Gel-Space Ratio of the Concrete)

### 5. 空隙率と圧縮強度の関係

セメントペースト全体に占める毛管空隙の比率である空隙率と圧縮強度の関係から圧縮強度に及ぼす毛管空隙の影響を考察する。

#### (1) 純ペースト

純ペーストにおける圧縮強度と平均空隙率の関係を Fig.19 に示す。純ペーストの圧縮強度は脆性多孔材料の強度と空隙率の関係を表す Ryshkewitch 式<sup>6)</sup>;式(28)に従うようであるが、空隙率が 0.15 程度に下がり密実になると Ryshkewitch 式から外れて強度が増大しており、空隙が関係した脆性破壊が生じにくくなることを示唆している。

$$F_c = F_0 \exp(-bP) \quad \dots \dots \dots (28)$$

$F_c$ : 圧縮強度  $F_0$ : 空隙率ゼロの圧縮強度

$b$ : 実験定数  $P$ : 空隙率

#### (2) コンクリート

実験の対象とした強度レベルのコンクリートでは破壊はモルタル-骨材界面のボンドクラックの進展によると言われている<sup>7)</sup>。Fig.19 に示すように、コンクリートの圧縮強度はセメントペーストの平均空隙率の増加に対し線形に減少していることから、モルタル-骨材界面の接着力が圧縮強度を支配していると推定される。

#### (3) まとめ

- ① ある程度の空隙を含む純ペーストの圧縮強度は脆性多孔材料の式で表され、密実になると強度が増大する。
- ② 実験で用いた普通コンクリートの圧縮強度はモルタル-骨材界面の接着力を支配する空隙量に支配されると推察される。
- ③ ゲル空間比だけでなく、セメントペーストの空隙率によっても強度を推定できる可能性がある。

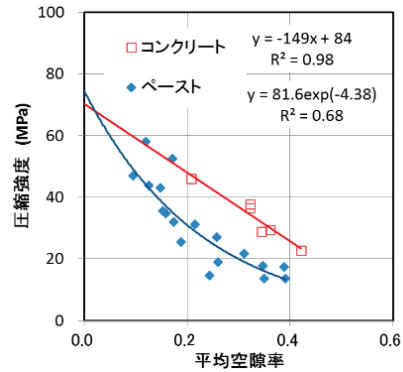


Fig.19 コンクリート強度と空隙率の関係  
(Relation between Compressive Strength and Capillary Pore Ratio of the Materials)

### 6. 構造体コンクリートの強度推定

BEI から導出したゲル空間比から圧縮強度を推定できることが示唆されたため、材齢数年から数十年の構造体コンクリートに適用した。実験室で作製した材齢 28 日コンクリートと比較して圧縮強度とゲル空間比の関係を Fig.20 に示す。構造体コンクリートは経年やボーリングの影響を受けている可能性があるが、概ね 1 つの関係線周辺にプロットされた。しかし、材齢 28 日の実験室コンクリート



の関係線から乖離している。

Neville は、水和反応完了前に相当の強度が発現した後は水和による強度の向上は小さいと定性的に述べている<sup>8)</sup>。この知見を考慮すると、経年でゲル空間比が増加しても強度増進は小さいため、長期材齢の構造体コンクリートの関係線は材齢 28 日の関係線と重ならず、右方に乖離していると推察される。

長期材齢の構造体コンクリートに対しても図中に示す経年コンクリートの回帰式でゲル空間比から圧縮強度を概ね推定が可能と考えられる。今後、データを増やして信頼区間を設定し、異常値の検出に利用する予定である。

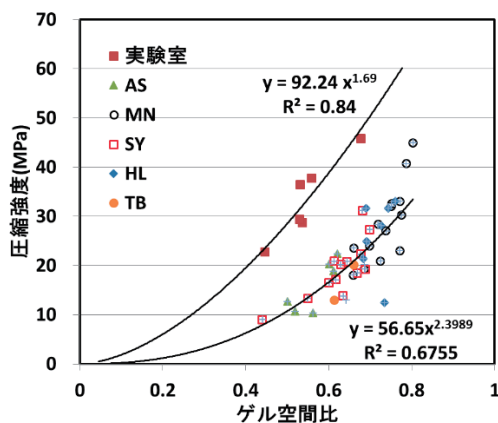


Fig.20 構造体コンクリート強度とゲル空間比の関係  
(Relation between Compressive Strength and Gel-Space Ratio of the Concrete in the Structures)

## V. おわりに

純ペーストおよびコンクリートのセメントペーストの SEM-BEI の輝度分布から Powers と Brownyard のモデルにおける毛管空隙、水和物、未水和セメントの領域を分離し、それぞれの体積率を求める方法を考案して適用した結果を以下に示す。

- ① 推定水セメント比の平均は実調査 W/C が高いほど低めとなる傾向があるが、ブリーディングを考慮すれば、平均値は実調査に相応の値を示すことを確認した。
- ② 推定水和率は養生条件や材齢に応じて変化することを確認した
- ③ 推定ゲル空間比は圧縮強度と高い相関を示すことを確認した
- ④ 開発した強度推定方法の実構造物への適用性を確認した

以上より、SEM-BEI からの Powers と Brownyard のモデルにおける各相の分離方法は実態に即したものと推察され、コンクリートの強度や耐久性の評価に有効な手段と考えられる。

## 参考文献

- 1) T.C.Powers, T.L.Brownyard ; Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste, Bull. 22, Res. Lab. of Portland Cement Association, Skokie, IL, U.S.A., reprinted from J. Am. Concr. Inst.(Proc.), Vol.43, 1947.
- 2) H.J.H. Brouwers ; The work of powers and Brownyard revisited: Part1, Cement and Concrete Research, 34, 2004, pp.1697-1716.
- 3) Ramachandran, V. S., Feldman, R. F. and Beaudoin, J. J. ; Concrete Science, Heyden, London, 1981, p.427.
- 4) Karen L. Scrivener ; Backscattered electron imaging of cementitious microstructures, Cement & Concrete Composites, 26, 2004, pp.935-945.
- 5) 岡村隆吉 ; セメント水和物の形態,セメント・コンクリート No.520, 1990.6, pp.50-54.
- 6) Ryshkewitch,E. ; Compression strength of porous sintered alumina and zirconia, Jour.of the Amer.Ceramic Society, Vol.36, No.2, 1953.
- 7) 日本コンクリート工学協会編:コンクリート便覧第二版,技報堂出版, 1996, p.236.
- 8) A. M. Neville, 三浦尚訳: ネビルのコンクリートバイブル,技報堂出版, 2004, pp.17-21.

## Method of Estimating the Mix Proportions and the Compressive Strength of Concrete Using the SEM-BEI of the Cement Paste

*Koji Satoyama, Jeon Jinhwan, Tetsushi Kanda and Toyoharu Nawa<sup>1)</sup>*

The authors propose a method of evaluating the compressive strength and the water-cement ratio of concrete from the cement paste microstructures in the hardened concrete. The method is based on the Powers model, which reliably reproduces the composition of the cement paste. The volume ratio of the composition phase was measured using a backscattered electron image (BEI) from a scanning electron microscope (SEM). The results of experiments using cement paste and concrete test specimens showed that the method could reasonably reproduce the compressive strength and the water-cement ratio of the test specimens. The results of experiments using aged structural concrete test specimens showed good correlation of the compressive strength and the gel space ratio measured using SEM-BEI. Therefore, it was shown that the method could be used to estimate mix proportions and construction conditions such as curing.