

# 論文 複数の物理化学的分析を組み合わせた硬化コンクリートの配合推定方法の提案

李 春鶴<sup>\*1</sup>・石田 哲也<sup>\*2</sup>・半井 健一郎<sup>\*3</sup>

**要旨:**本研究では、コンクリートおよび骨材の酸化カルシウム含有量を測定する化学分析と水和の進行により生じた空隙および水和収縮により生じた空隙などの物理的な空間構造分析の組み合わせにより、既存の手法における適用対象材料の制限や煩雑さなどの問題点を改善し、なおかつ、高い推定精度を実現する配合推定方法の開発を行った。提案手法の適用性を実験室レベルで作製した既知の供試体の配合分析により検証するとともに、実構造物の配合推定にも有効であることを確認した。

**キーワード:** 配合推定, 硬化コンクリート, 化学分析, 実構造物, 単体量

## 1. はじめに

コンクリート構造物の劣化進行に大きな影響を与えるコンクリート中の水分・気体の移動および水和生成物の化学反応は、空隙構造をはじめとするコンクリートの材料品質に依存する<sup>1)</sup>。コンクリート材料品質評価においては、養生等の影響評価も重要ではあるが、水セメント比および骨材量らの初期配合が評価の基本となる。自己充填性を有さないコンクリートを使用した場合、施工の影響を受けることで計画配合通りの品質が担保されない可能性がある<sup>2)</sup>ため、施工完了後の構造物内における実配合は、示方配合と異なることがある。これらの観点から考えれば、硬化コンクリートの配合分析方法を検討することは、構造物の寿命予測・評価にとって重要な要素になると考えられる。加えて、たとえば東京大学コンクリート研究グループで開発している熱力学連成解析システム<sup>0)</sup>のような手法を用いて実環境に曝されている実構造物の寿命予測・評価を行う場合にも、まず、入力情報としての材料品質、つまり初期状態の水セメント比および骨材量の確定が必要である。そこで本研究では、硬化コンクリートの分析を対象にして、適用範囲が広く、かつ精度よく推定できる試験方法の確立を目的とする。

## 2. 配合推定方法に関する既往の研究

硬化コンクリートの配合推定方法に関する試験方法は、セメント協会法<sup>4)</sup>、ASTM法<sup>5)</sup>、ICP法<sup>6)</sup>、フッ化水素酸法<sup>7)</sup>、グルコン酸ナトリウム法<sup>8)</sup>などがある。この中で、セメント協会法<sup>4)</sup>、ICP法<sup>6)</sup>およびフッ化水素酸法<sup>7)</sup>は、単体セメント量、単体骨材量および単体水量を求めることができるが、ASTM法<sup>5)</sup>とグルコン酸ナトリウム法<sup>8)</sup>は単体セメント量しか同定することができない。

日本における代表的な方法であるセメント協会法<sup>4)</sup>は、骨材に含まれるカルシウム量を仮定する必要がある、全国で通常

使われている骨材の平均値を与えて算出する手法が一般的である。したがって、実際に使用された骨材中のカルシウム含有量が平均値から乖離する場合は誤差が大きくなる。また、石灰石骨材や貝殻が混入した海砂といったカルシウムを多く含む骨材が使用されたコンクリートには、原理上適用することができない。フッ化水素酸法は、フッ化水素酸が人体に有害であること、またEDTAの滴定による酸化カルシウムの定量を行うための化学的操作が熟練を要するといった欠点がある。一方、ICP法は単体セメント量を $\pm 15 \text{kg/m}^3$ の範囲で測定できる精度の高い実験方法であるが、これは可溶性シリカを指標としてセメント量を推定する方法であるため、アルカリ骨材反応が生じた場合は、骨材のシリカがセメント硬化体に溶解され、単体セメント量の推定値が大きくなり精度が低下するという欠点がある。

## 3. 新しい配合推定方法の提案

### 3.1 新しい配合推定方法の構成

本配合推定方法では、三つの仮定を設けることにした。仮定一:コンクリートには混和材は使用されていない。すなわち、コンクリート試料の全酸化カルシウム量は、普通ポルトランドセメントに含有される量と骨材内部に含む量の二相の総和とする。仮定二:硬化コンクリートに含まれる空気泡(エントラップドエア、エンレインドエア)は、ASTMの規定による飽和状態においても<sup>9)</sup>、水で占められないと仮定する。空気泡は独立した空隙になっているため、真空などの環境作用を加えない限り、空気泡の空気は水に交換されないと仮定される。したがって、本研究で採用する吸水率の測定方法<sup>9)</sup>を用いた場合には、空気泡は水分で占められないとした。仮定三:硬化コンクリートを水中に浸漬すると、水和により生成された空隙と水和収縮により生成された空隙は水で満たされると仮定する。使用された練り混ぜ水は、練り混ぜ直後は

\*1 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

\*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 講師 博士(工学) (正会員)

セメントおよび骨材と混濁された状態(自由水の状態)にあるが、時間の経過とともに、その水の一部はセメントと結合して、結合水の状態となる。他の余剰水分は、通常、その一部がコンクリート中の自由水として残り、他は大気中に蒸発してしまう。大気中に蒸発した水がもともとコンクリート中で占有していた場所は、水の蒸発後は連続された空隙として残る。一方、セメント水和によって水和収縮<sup>3)</sup>が起こり、その水和収縮に当たる体積も空隙として生成される。コンクリート試料を水中に浸漬すると、これらの連続空隙は再度水で満たされると仮定した。

本試験方法は、セメントに含まれる化学成分の中で、量が多くかつ比較的変動が少ない酸可溶性酸化カルシウムに着目し、マトリックス干渉(試料に共存する主成分による測定値の上乗せや目減りする現象)が少ない誘導結合プラズマ発光分光分析装置(ICP)を用いて配合推定を行う<sup>6)</sup>。このようにすることで、アルカリ骨材反応が生じた経年コンクリートにも適用できる。

既往の分析方法においては、吸水率といった骨材の特性値は、代表的な骨材の特性を平均値として与えることが多い。ただし、実際に使用されているものと仮定した骨材の特性が乖離する場合、大きな誤差を生じさせることが予想される。そこで、本提案方法では、コンクリートのサンプルから骨材を取り出して、実際の骨材の特性値を測定することとした。

結合水はコンクリート試料と骨材の強熱減量から求める。石灰石骨材を用いたコンクリート試料と硬質砂岩骨材を用いたコンクリート試料は600℃を超えると明らかに質量減少が異なり<sup>8)</sup>、前者は後者より大きくなることが報告されている。これは石灰石骨材および貝殻の質量減少百分率は、600℃を超えると急激に増加し、主成分である炭酸カルシウムが分解するためであると考えられる。本提案方法は、骨材の種類に関わらず推定できる方法を目指していることから、コンクリートと骨材の電気炉内での強熱減量試験時は500℃を越えないよう設定した。一方結合水量は、105℃と1000℃の質量差によって算出する<sup>10)</sup>。強熱処理温度を500℃にした場合、強熱減量は1000℃と比べて当然少なくなる。したがって、水和セメントの結合水を求めるためには、500℃強熱減量による求められる水量について修正が必要である。この修正値は、コンクリート試料からセメントペースト部分を取り出して、熱分析による500℃と1000℃での質量減量差から算出することにした。

### 3.2 新しい配合推定方法の流れ

新しく提案した配合分析の流れを図-1に示す。

#### (1) 試料の準備

まず、供試体を各方向の長さが粗骨材最大寸法の2倍以上になるようにコンクリートカッターで切断する。切断した隣接するコンクリートサンプルから一つは骨材特性値測定に、もう一つはコンクリートの特性を測定するために供する。骨材

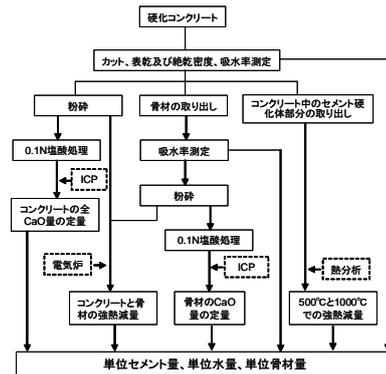


図-1 硬化コンクリートの配合推定のフロー図

特性値測定用サンプルを破砕してすべての骨材を可能な限り採取し、5mm以上の骨材と5mm以下の骨材に分けることで、粗骨材と細骨材として分類する。その後、0.05Nの希塩酸に30秒程度浸漬させ、骨材表面に付着しているセメントペースト微粉末を除去する。

#### (2) コンクリートの密度と吸水率の測定<sup>9)</sup>

- 1, 切断したコンクリート供試体を105℃電気炉に入れて24時間絶乾させる。
- 2, 絶乾したサンプルを水に入れて48時間飽和させる。その後、5時間沸騰させて14時間室温で飽和させる。飽和後、布で表面の水を拭き取り、質量を0.1gの精度まで測り、表乾質量とする。またアルキメデス法でサンプルの体積を測る。
- 3, 再びサンプルを105℃電気炉に入れて24時間乾燥させてからデジケータ(乾燥剤あり)に入れて冷却・保管する。
- 4, 粉砕する直前に質量を0.1gの精度まで測り、絶乾質量とする。
- 5, 測定値を用いて、コンクリートの表乾密度、絶乾密度および吸水率を算出する。

#### (3) 骨材の吸水率の測定<sup>9)</sup>

- 1, 細・粗骨材を105℃電気炉に入れて24時間絶乾させる。
- 2, 絶乾した細・粗骨材を水に入れて充分飽和するまで静置させる(コンクリート試料の場合と同じ過程の浸漬時間)。飽和後、布で表面の水分を拭き取り、それぞれ質量を0.1gの精度まで測り、表乾質量とする。
- 3, 再び骨材を、105℃の電気炉で24時間乾燥を施した後、デジケータ(乾燥剤あり)に入れて、室温まで冷却し、その後、それぞれ質量を0.1gの精度まで測り、絶乾質量とする。
- 4, 細・粗骨材の吸水率をそれぞれ算出する。
- 5, 骨材の吸水率は、次式により求める。

$$P_2 = w_G \cdot P_G + w_S \cdot P_S \quad (1)$$

ここで、 $P_2$ ; 骨材の吸水率[質量%],  $P_G$ ; 粗骨材の吸水率[質量%],  $P_S$ ; 細骨材の吸水率[質量%],  $w_G$ ; 粗骨材の重み係数,  $w_S$ ; 細骨材の重み係数である。細・粗骨材の重み係数は、粗・細骨材の単位量の情報(財産図など)がある場合以下の式により求める。

$$w_G = \frac{m_G}{m_G + m_S} \quad (2a)$$

$$w_S = \frac{m_S}{m_G + m_S} \quad (2b)$$

ここで、 $m_G$ ;粗骨材の単位量[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $m_S$ ;細骨材の単位量[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]である。

もし細・粗骨材の単位量の情報がない場合は、以下の式により求める。

$$w_G = w_S = 0.5 \quad (2c)$$

#### (4) コンクリートおよび骨材の粉砕

1, コンクリート測定用サンプルをまず大まかに粉砕してセメントペースト部分 20mg 程度を取り出して熱分析に供する。

2, (4)1の残りのコンクリート測定用サンプルと(3)の細・粗骨材を 150 $\mu\text{m}$  のふるい分けを全て通るようにそれぞれ粉砕して、均一になるように十分に混ぜる。

#### (5) コンクリートと骨材の酸化カルシウム量の測定

1, 粉砕した試料の約 1g を 0.1mg の精度まで測る。その後、0.1N の 250ml 塩酸に、試料と回転子を入れてマグネチックスターラーの上で 20 分間回転させることで溶解する。

2, 溶液を 185mm の 5 種 C のろ紙でろ過する。鉄製の鉢を使って試料を粉砕する場合、試料に鉄粉が入り込むため、その鉄粉の量を把握する必要がある。鉄粉は回転子(磁石)に付着するので、回転子についている鉄粉を乾燥、分離して質量を 0.1mg の精度まで測る。

3, ろ液を 500ml に調製し、10ml を採って 100ml に希釈する。まず、ろ液 10ml を 100ml のメスフラスコに入れる。その後、内標準としてイットリウム濃度が 10mg/l になるようにイットリウムとイオン交換水を入れて調整する。

4, 定溶した溶液は ICP を用いて、カルシウムイオン濃度を測定し、コンクリートおよび細・粗骨材の酸化カルシウム量を以下の式によりそれぞれ算定する。

$$\rho_{CaO} = \frac{\rho_{Ca} \cdot 100 \cdot \frac{500}{10} \cdot \frac{M_{CaO}}{M_{Ca}}}{m \cdot 1000} \cdot 100 \quad (3)$$

ここで、 $\rho_{CaO}$ ;コンクリートおよび細・粗骨材の酸化カルシウム量[質量%],  $\rho_{Ca}$ ; ICP で計測した酸化カルシウムの濃度[ $\text{mg}/\text{l}$ ],  $M_{CaO}$ ;酸化カルシウムのモル質量量[=56g/mol],  $M_{Ca}$ ;カルシウムのモル質量量[=40g/mol],  $m$ ;試料の質量[g]である。

5, 以上の 1~4 の作業を繰り返し、三つのサンプルを測定して平均を取り、平均値との誤差が $\pm 1\%$ に収めることを確認し、超える場合は(5)の 1, からやり直す。

6, 骨材の酸化カルシウム量は、次式により求める。

$$\gamma = w_G \cdot \gamma_G + w_S \cdot \gamma_S \quad (4)$$

ここで、 $\gamma$ ;骨材の酸化カルシウム量[質量%],  $\gamma_G$ ;粗骨材の酸化カルシウム量[質量%],  $\gamma_S$ ;細骨材の酸化カルシウム量[質量%]である。

#### (6) コンクリートと骨材の強熱減量の測定

1, (4)で粉砕した試料を約 2g 採取し質量を 0.1mg の精度まで測る。

2, 500 $^{\circ}\text{C}$ の電気炉に入れて 2 時間加熱する。その後、デジケーター(乾燥剤あり)に入れて室温まで冷却する。

3, 冷却後の試料の質量を 0.1mg の精度まで測る。

4, 強熱後の試料と回転子を水に入れ、マグネチックスターラーで 1 分間掻き混ぜ、回転子に付着している鉄粉を乾燥、取り出してその質量を 0.1mg の精度まで測る。

5, 測定値を用いて、コンクリートおよび細・粗骨材の強熱減量をそれぞれ算出する。

6, 骨材の強熱減量は、次式により求める。

$$\alpha = w_G \cdot \alpha_G + w_S \cdot \alpha_S \quad (5)$$

ここで、 $\alpha$ ;骨材の 105 $^{\circ}\text{C}$ ~500 $^{\circ}\text{C}$ の強熱減量[質量%],  $\alpha_G$ ;粗骨材の 105 $^{\circ}\text{C}$ ~500 $^{\circ}\text{C}$ の強熱減量[質量%],  $\alpha_S$ ;細骨材の 105 $^{\circ}\text{C}$ ~500 $^{\circ}\text{C}$ の強熱減量[質量%]である。

#### 3.3 単位量の算定

前小節で測定した測定値を用いて、絶乾時のコンクリート中の各組成の質量割合は、次式により求める。

$$X + Y + Z = 100 \quad (6a)$$

$$a = \alpha \cdot Y / 100 + Z - aa \cdot (X + Z) \quad (6b)$$

$$b = \beta \cdot X / 100 + \gamma \cdot Y / 100 \quad (6c)$$

ここで、 $X$ ;セメント量[%],  $Y$ ;骨材量[%],  $Z$ ;結合水[%],  $\beta$ ;セメントの酸化カルシウム[質量%],  $a$ ;コンクリートの 105 $^{\circ}\text{C}$ ~500 $^{\circ}\text{C}$ の強熱減量[質量%],  $b$ ;コンクリートの酸化カルシウム量[%],  $aa$ ;結合水の補正係数で、500 $^{\circ}\text{C}$ と 1000 $^{\circ}\text{C}$ の強熱減量の相違を補正する係数である。絶乾後のコンクリートから取り出したセメントペースト試料を熱分析に供することで、以下のように求められる。

$$aa = \frac{Mcp_{500} - MCP_{1000}}{Mcp_{105}} \quad (7)$$

ここで、 $Mcp_{105}$ ;絶乾セメントペーストの質量[mg],  $Mcp_{500}$ ;500 $^{\circ}\text{C}$ でのセメントペーストの質量[mg],  $Mcp_{1000}$ ;1000 $^{\circ}\text{C}$ でのセメントペーストの質量[mg]である。

式(6)と式(7)を連立して解くことで、絶乾状態コンクリートの質量割合が計算される。絶乾状態のコンクリートの質量割合から、練り混ぜ時のセメントと水の単位量が求められる。

$$C = X \cdot \rho_d / (100 + P_1) \quad (8a)$$

$$W = \rho_d \cdot (Z + P_1 - bb \cdot Z - P_2 \cdot Y / 100) / (100 + P_1) \quad (8b)$$

ここで、 $C$ ;単位セメント量[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $W$ ;単位水量[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $\rho_d$ ;コンクリートの表乾密度[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $P_1$ ;コンクリートの吸水率[質量%],  $bb$ ;水和収縮による単位水量の補正係数である。

$$bb = \frac{\rho_u - \rho_w}{\rho_w} \quad (9)$$

ここで、 $\rho_u$ ;結合水の密度(=1.25x10<sup>3</sup>[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ])<sup>0</sup>,  $\rho_w$ ;水の密度(=1.0x10<sup>3</sup>[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ])である。

単位骨材量は質量法と体積法があり、それぞれ次式によ

表-1 供試体の示方配合

供試体	粗骨材最大寸法 [mm]	水セメント比 [%]	セメント [kg/m <sup>3</sup> ]	水 [kg/m <sup>3</sup> ]	粗骨材 [kg/m <sup>3</sup> ]	細骨材 [kg/m <sup>3</sup> ]	空気量 [%]
モルタル	—	75	458	343	—	1315	1.0
コンクリート	20	55	322	176	969	833	4.0

って算定できる。

$$G_m = Y \cdot \rho_d \cdot (1 + P_2 / 100) / (100 + P_1) \quad (10a)$$

$$G_v = \rho_G \cdot (1 - C / \rho_c - W / \rho_w - A) \quad (10b)$$

ここで、 $G_m$ ；質量法による単位骨材量[kg/m<sup>3</sup>],  $G_v$ ；体積法による単位骨材量[kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_c$ ；セメントの密度 [kg/m<sup>3</sup>], 普通は3.15x10<sup>3</sup>[kg/m<sup>3</sup>]を使い,  $\rho_G$ ；骨材の表乾密度[kg/m<sup>3</sup>],  $A$ ；空気量(財産図に記載がある場合はその値に, ない場合は4%にする。)である。

式(10a)に示すように, 質量法により単位骨材量を推定する場合には, 練混ぜ時の骨材が全て表乾状態にあることを暗に仮定している。ここで, 実際の状況として骨材の品質管理が十分であり, 使用された全ての骨材が均一な表乾状態にあるとすれば, 精度良く推定が可能である。仮に以上の条件に無い場合は, 単位骨材量の算定値に誤差が生じると考えられる。骨材内部の水分状態は, 骨材自体の算定値に影響を及ぼすが, 単位水量と単位セメントの換算には影響を与えない。一方の体積法は, 骨材量を求めるにあたって内部水分状態の影響を排除することができる手法で, 式(10b)により, 練混ぜ時の構成材料の体積の総和が1になるという条件に基づいて単位骨材量が算出される。

#### 4. 新しい配合推定方法の検証

##### 4.1 実験室レベルでの検証

###### (1) 供試体の作製

実験室で作製したモルタルおよびコンクリート供試体の配合推定分析を行い, 提案方法の検証を行った。表-1 は供試体の示方配合を示し, この供試体に用いたセメントおよび骨材の特性値はそれぞれ表-2, 表-3 に示す。供試体はいずれも直径 10cm, 高さ 20cm の円柱で, 28 日間水中養生後, 上部 1cm をカットして, 残りの部分を配合分析に用いた。残りの部分を上から 4cm ずつカットし, 上の部分はコンクリート測定に, 下の部分は骨材用に用いた。モルタルおよびコンクリートは一体ずつ配合推定を行った。

###### (2) 配合推定結果

表-4 は, 配合推定結果であり, 図-2 と図-3 は, それぞれコンクリートとモルタル供試体の各推定値が示方配合に対しての変化を示している。提案する配合推定における,

表-2 セメント特性値(セメント成績表)

種類	密度[kg/m <sup>3</sup> ]	CaO含有量[%]
OPC	3150	64.09

表-3 骨材の特性値(測定値)

供試体	吸水率 [%]	強熱減量 [%]	CaO含有量 [%]
モルタル	1.12	1.20	0.75
コンクリート	0.94	1.16	0.64

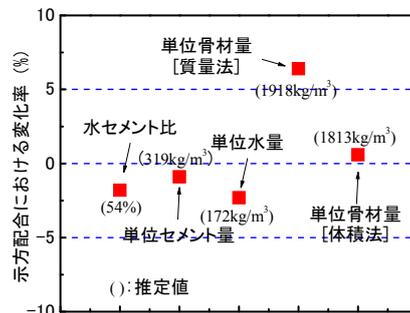


図-2 配合推定精度 (コンクリート)

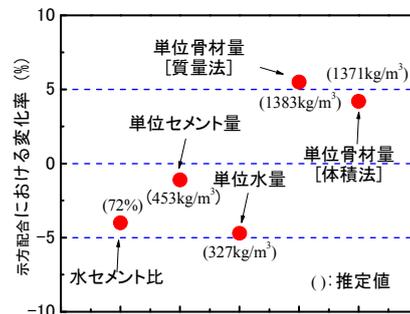


図-3 配合推定の精度 (モルタル)

空気泡は水で満たされないという仮定二の妥当性を検討するため, 本仮定が成立せず全ての空気泡が水で満たされるとした計算をあわせて示した。なお, 仮定二の有無に関わらずセメントおよび骨材の推定値は変化しない。単位水量の推定値は, 仮定二の有無によって変動し, 仮定二がない場合には空気泡に充満された水の量だけ小さくなり, 示方配合からより乖離した。空気量の大きな試験体ほど推定値の誤差は大きくなった。したがって, 空気泡を独立した空隙として捉え, 本試験方法のような飽和状態においても空気泡には水が浸透し得ないとした仮定二の導入は, 手法全体の

表-4 配合推定結果

供試体	水セメント比 [%]	セメント [kg/m <sup>3</sup> ]	水 [kg/m <sup>3</sup> ]		骨材 [kg/m <sup>3</sup> ]	
			仮定二無し	体積法	体積法	質量法
モルタル	72	453	327	317	1371	1383
コンクリート	54	319	172	132	1813	1918

表-5 推定結果の変動範囲(骨材は質量法)

セメント CaO含有量[%]	骨材			水セメント比 [%]	セメント [kg/m <sup>3</sup> ]	水 [kg/m <sup>3</sup> ]	骨材 [kg/m <sup>3</sup> ]
	吸水率[%]	強熱減量[%]	CaO含有量[%]				
63.00	1.10	1.30	0.50	51	329	167	1914
64.09	0.94	1.16	0.64	54	319	172	1918
65.00	0.80	1.10	0.80	57	310	175	1924
示方配合				55	322	176	1802

精度確保の観点から妥当であることを示唆していると考えられる。

表-4および図-2と図-3に示すように、単位骨材量は推定方法が体積法と質量法のどちらを用いるかによって異なるが、その他の水セメント比、単位セメント量、単位水量は、単位骨材量算定手法の選択とは独立して決定する。異なる仮定に基づく骨材量の推定に対しては、式(10a)に従って質量を単位体積量に換算した場合(質量法)、骨材量を大きめに見積もる傾向があり、その誤差は6%~7%であるが、式(10b)に従って単位骨材量を推定する場合(体積法)は、その誤差が小さくなる傾向があった。練混ぜ時の骨材の含水状態が把握できない場合、骨材の表乾状態を仮定している質量法よりも、内部含水状態を把握する必要がない体積法による推定はより現実に近いと考えられる。

### (3) 本配合推定方法の精度に関する検討

図-2と図-3に示すように、水セメント比に関しては、コンクリートは-1.8%程度、モルタルは-4%程度の精度で推定できた。単位セメント量に関しては、モルタルおよびコンクリートによらず、-1%程度の精度があり、単位水量については、コンクリートが-2%程度、モルタルが-5%程度の精度があると推定される。すなわち、セメント量および水量は実際の設計より小さく評価する傾向がある。これは二つの理由で説明できる。一つは、骨材の特性値を測定する時の仮定による誤差である。すなわち、骨材の強熱減量、骨材の酸化カルシウム量、骨材の吸水率を測定する際、セメントペーストを完全に除去する必要があるが、厳密には困難である。骨材表面に付着したセメントペーストの存在によって、強熱減量、酸化カルシウム量および吸水率は純骨材の特性値より大きくなると推定される。従って、式(8)によって、骨材の質量割合を大きく見積もり、セメントペーストの質量割合は小さく見積もる傾向がある。また、式(8)および式(10)が示すように、骨材の特性値を大きく見積もることによって、単位セメント量、単位水量への算定にあたっては、小さく見積もる傾向があり、骨材の量は逆に大きく見積もる傾向がある。この精度は骨材をどれほど正確に採取できるかに拠ると考えられる。もう一つは、ブリーディングの影響である。つまり、固まる段階前にブリーディングが起り、水の量が設計より小さくなるからである。従って、水セメント比が高いほどこの影響が大きくなると推察される。本検証実験で、水セメント比の高いモルタルにおける単位水量の差が、水セメント比の低いコンクリートよりも大きくなったことは、上述の推察を証明すると考えられる。この影響は

本提案方法の誤差ではない。

このように、測定誤差に関しては、骨材の特性を測定する際の誤差が、比較的変動が大きいと予想される。表-3の骨材の特性値を参考にして、骨材の吸水率が0.8~1.1%、骨材の強熱減量が1.1~1.3%、骨材の酸化カルシウム含有量が0.5~0.8%の範囲で変化する場合のコンクリートの配合推定の精度について検討を行った。また、式(5c)に示すように、本配合推定方法で配合推定を行う場合、予めセメントの酸化カルシウム含有量を定める必要がある。もし、施工当時に用いたセメントの酸化カルシウム含有量が不明な場合、その値を仮定する必要がある。この仮定によって配合推定の結果に影響を及ぼす。一般には、普通ポルトランドセメントの酸化カルシウムの含有量は64%前後であるのが標準的であり、本確認試験に用いたセメントの酸化カルシウム含有量は64.09%である(表-2)。近年、日本で生産された普通ポルトランドセメントの酸化カルシウム含有量の平均値は64%程度である事実<sup>1)</sup>を例にあげて、63.0~65.0%で変動する場合の配合推定結果の変動について検討を行った。表-5は、セメントの酸化カルシウム含有量についての仮定の変動および骨材の特性値の測定変動が配合推定に及ぼす総合的な影響効果を示す。表に示すように、上記の特性値の変動範囲で単位セメント量の変動範囲は±10kg/m<sup>3</sup>であり、水セメント比の変動範囲は±3%である。

配合分析の流れの(5)の5、でコンクリートの酸化カルシウム測定値の許容範囲を±1%で制御したが、この際、コンクリート供試体のセメント、水および骨材の推定値の変動はそれぞれ±0.9%、±0.1%、±0.2%であり、十分な精度が保てると判断される。

## 4.2 実構造物での検証

### (1) 実構造物の概要

JSCE 335委員会(委員長:岸利治准教授)が行った信楽線高原鉄道第一大戸川橋梁の調査の一環として、右岸線沿いに置かれたクリープ試験供試体の配合分析を実施した。

信楽線高原鉄道第一大戸川橋梁は、昭和29年に建設された支間30mのポストテンションプレストレスト橋梁で、設計施工管理は、国鉄大阪工事事務所次長の仁杉巖博士が担当した。この橋梁は、日本の初の本格的なプレストレストコンクリート橋であり、その当時は鉄道橋としては世界的にもその例がほとんどなかったため、設計施工に当たって慎重な検討を行うとともに、不明点については十分な実験研究を行って

安全と技術の向上を図ったものであり、徹底的な現場施工管理がされた<sup>12)</sup>。信楽線高原鉄道第一大戸川橋梁において使用された早強セメントは浅野ペロセメントであり、当時のセメントの特性値の例を表-6に示す。

表-6 セメントの特性値<sup>13)</sup>

種類	密度[kg/m <sup>3</sup> ]	CaO含有量[%]
早強	3150	65.66

## (2) 配合推定結果および精度に関する検討

本確認実験は、クリープ試験供試体のウェブでΦ50x170mmのコアを抜き、半分に切断した。そのうち、線路側のコアをコンクリート分析用、残りの半分を骨材特性値(強熱減量, CaO含有量)の測定用に用いた。骨材の特性値は表-7に示す。

表-7 骨材の特性値(測定値)

吸水率 <sup>12)</sup> [%]	強熱減量[%]	CaO含有量[%]
0.65	1.62	0.6

配合推定結果と示方配合の比較を表-8に示す。表に示すように、単位量には大きな差があるものの、水セメント比は非常に良い精度があると考えられる。

表-8 配合推定結果と示方配合の比較

	水セメント比 [%]	セメント [kg/m <sup>3</sup> ]	水 [kg/m <sup>3</sup> ]	骨材(体積法) [kg/m <sup>3</sup> ]
配合推定	35	309	107	1962
示方配合	36	450	162	1812

本試験に用いたコア供試体は、直径が50mm、長さが170mmのサイズであり、そのコンクリート分析用のサイズは直径が50mm、長さが85mmであり、供試体の粗骨材最大寸法が40mmということを検討した場合、骨材量の偏りが起こりやすく、推定単位骨材量の誤差が大きくなった可能性がある。しかし、水セメント比の推定には影響がない。本配合推定方法の実験室レベルでの検証を勘案すれば、実構造物での推定も妥当性があり、有効であることが考えられる。

- 2) 石田哲也ほか: 鉄筋コンクリート部材に発生する材料不均一性の定量評価, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp187~201, 2001
- 3) Maekawa, K. et al.: Modelling of Concrete Performance, E&FN SPON, 1999
- 4) コンクリート専門委員会: 硬化コンクリートの配合推定について, セメント・コンクリート, No.251, pp3-12, 1968
- 5) Designation: Standard Test Method for CEMENT CONTENT OF HARDENED PORTLAND CEMENT CONCRETE, ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, C85-66, pp.43-46, 1986
- 6) 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方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp347-352, 1990
- 7) 河合研治, 小林一輔: 硬化コンクリートの単位セメント量の推定方法に関する研究, 土木学会論文集, 第402号/V-10, pp.145-150, 1989
- 8) 日本非破壊検査協会: 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, NDIS 3422, 2002
- 9) Designation: Standard Test Method for Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, C642-90, pp324-325, 1990
- 10) 山田順治, 有泉 昌: 分かりやすいセメントとコンクリートの知識, 鹿島出版会, 1976
- 11) セメント協会: セメントの常識, 2007.1
- 12) 仁杉 巖: 支間30mのプレストレストコンクリート鉄道橋(信楽線第一大戸川橋梁)の設計, 施工およびこれに関連して行った実験研究の報告, 土木学会論文集, 第27号, pp.1-56, 1955
- 13) 日本セメント株式会社社史編纂委員会編: 百年史, 日本セメント株式会社, pp.476-477, 1983

## 5. まとめ

本研究で提案した複数の物理化学的分析を組み合わせた新しい配合推定方法によって配合推定を行った結果、硬化コンクリート中の水セメント比, 単位セメント量, 単位水量, および単位骨材量を精度良く推定できることが判り、実構造物にも有効であることが確認できた。

## 謝辞

本研究において、有意義な御示唆を頂いた前川宏一教授(東京大学大学院)および岸利治准教授(東京大学生産技術研究所)に深謝いたします。実構造物の分析に当たって、貴重な試料をご提供いただいた335委員会(委員長: 岸利治准教授), および信楽高原鉄道株式会社の関係各位に深く感謝いたします。また本実験の一部は、科学研究費補助金(若手研究(A)課題番号 18686037, 代表者: 半井健一郎)を受けて実施したものであり、実験の実施に当たっては、群馬大学工学部社会環境デザイン工学科コンクリート研究室の石井祐輔氏をはじめとする4年生に多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Ishida, T. et al.: Theoretically Identified Strong Coupling of Carbonation Rate and Thermodynamic Moisture State in Micropores of Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 2(2) pp.213-222, 2004