

# 論文 フレッシュコンクリートにおける水セメント比の簡易推定方法に関する基礎的研究

若松 岳\*<sup>1</sup>・相原 功\*<sup>2</sup>・近松 竜一\*<sup>3</sup>・平田 隆祥\*<sup>4</sup>

**要旨：**コンクリートを打ち込む前に、その品質を把握することは、コンクリート構造物の品質保証の上で重要である。そこで、フレッシュコンクリートの単位容積質量と空気量を測定することにより、水セメント比を推定する手法を提案した。材料の比重や計量値のばらつき、測定方法による計測値のばらつきを考慮し、本手法の精度を室内試験、実機試験により確認した結果、フレッシュコンクリートの水セメント比を一定の誤差のもとで、迅速にかつ簡易に推定できることが明らかとなった。

**キーワード：**フレッシュコンクリート、水セメント比、品質管理、受入検査、迅速測定法

## 1. はじめに

硬化後のコンクリートの品質をフレッシュコンクリートの時点で予測することは、コンクリート構造物の品質保証を行う上で重要である。通常、フレッシュコンクリートの受入れ時の品質検査としては、スランプ、空気量、温度、単位容積質量、塩化物イオン量などが試験され、このうち、スランプは、測定条件が一定であればある程度水量の変化をとらえることはできるが、製造後に経時変化が生じることや、混和剤の量や温度、空気量により変化するため、水セメント比の指標とすることはできない。

フレッシュコンクリートの水セメント比を推定する方法は、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」、ウエ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[1]、コンクリートの空中重量と水中重量を測定して求める方法[1]などの他、様々な提案がなされているが[2]、低廉かつ簡易であり、現場で素早く結果が得られる方法は確立されているとはいえない。

本研究は、現場で通常の管理試験として行われている空気量と単位容積質量の測定結果を用いて、フレッシュコンクリートの水セメント比を迅速に推定する手法[3]を提案するものである。

## 2. 水セメント比の算定方法

空気量を除いたコンクリートの単位容積質量は、様々な要因で試料の空気量が変動しても、空気量以外の構成材料に対して固有の値となる。本手法は、材料の比重が不変の仮定のもと、空気量を除いたコンクリート単位容積質量に着目し、これを水セメント比の指標に用いたものである。

本手法による試験方法は、従来のモルタルの空中重量と水中重量から水セメント比を求める方法と異なり、コンクリートそのものを用いて水セメント比を求めるため、モルタルを分離させる作業がなくなり簡便な手法であるとともに、骨材にセメントペーストが付着して試料の配合が変

\* 1 (株)大林組技術研究所土木第三研究室研究員 (正会員)

\* 2 (株)大林組技術研究所コンサルタント部部長 (正会員)

\* 3 (株)大林組技術研究所土木第三研究室研究員、工修 (正会員)

\* 4 (株)大林組技術研究所土木第三研究室研究員 (正会員)

動することもなくなる。また、コンクリートの水中重量を測定する必要もない。

以下に水セメント比の算定方法を示す。

空気を除いたコンクリートの単位容積質量をTとすると式(1)(2)(3)が成り立ち、 $A_T$ を消去すると式(4)が導かれる。

$$T = W_T + C_T + A_T \quad (1)$$

$$W_T / \rho_w + C_T / \rho_c + A_T / \rho_A = 1000 \quad (2)$$

$$\rho_A = (S + G) / (S / \rho_s + G / \rho_g) \quad (3)$$

ここに、 $T$  : 空気を含まないコンクリートの単位容積質量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$W_T$  : 空気を含まないコンクリートの単位水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_T$  : 空気を含まないコンクリートの単位セメント量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$A_T$  : 空気を含まないコンクリートの単位骨材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$S$  : 単位細骨材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $G$  : 単位粗骨材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_w$  : 水の比重、 $\rho_c$  : セメントの比重、 $\rho_A$  : 骨材の表乾比重

$\rho_s$  : 細骨材の表乾比重、 $\rho_g$  : 粗骨材の表乾比重

$$W_T / C_T = (1000 / C_T) \times \{ \alpha - (\alpha - 1) \times T / 1000 \} + \beta \quad (4)$$

ここに、 $\alpha = 1 / (1 - 1 / \rho_A)$ 、 $\beta = \alpha \times (1 / \rho_A - 1 / \rho_c)$

一方、試料の空気量と単位容積質量の測定結果から、空気を除いたコンクリートの単位容積質量Tは式(5)で求めることができる。以上により、式(4)(5)を用いて、コンクリートの単位容積質量と空気量を測定することにより、水セメント比を求めることができる。

$$T = M / (1 - A / 100) \quad (5)$$

ここに、 $M$  : コンクリートの単位容積質量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $A$  : 空気量 (%)

### 3. 水セメント比の推定誤差の検討結果

本手法による水セメント比の計算においては、製造時における材料の計量の変動、材料の比重の変動、空気量や単位容積重量の測定誤差等により、推定結果に誤差が生じる。そこで、表-1に示す水セメント比が35~65%の4水準の普通コンクリートに対し、表-2に示す変動要因により定まる真の水セメント比と、水セメント比推定値との差を計算により求め、推定誤差の範囲を求めた。なお、式(4)におけるセメント量 $C_T$ は、どのケースとも設計量とした。

表-1 配合表および水セメント比算定式の係数

No.	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単体量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				水セメント比推定式の係数			
				W	C	S	G	$\rho_A$	$C_T$	$\alpha$	$\beta$
①	35.0	39	4.5	160	457	643	1064	2.6254	478.6	1.6152	0.1041
②	45.0	41	4.5	160	356	725	1064	2.6228	372.9	1.6162	0.1048
③	55.0	43	4.5	160	291	779	1064	2.6212	304.6	1.6168	0.1052
④	65.0	44	4.5	160	246	815	1064	2.6202	257.6	1.6172	0.1054

ただし、C : 普通ポルトランドセメント (比重 $\rho_c=3.16$ )

S : 山砂 (比重 $\rho_s=2.57$ )、G : 碎石 (比重 $\rho_g=2.66$ 、最大寸法20mm)

表－2 水セメント比推定値に影響する変動要因と変動量の設定

変動要因	材 料 の 計 量 誤 差					材 料 の 比 重 誤 差			測 定 誤 差			
	水	セメント	細骨材	粗骨材	表面水率 (細骨材)	表面水率 (粗骨材)	セメント	細骨材	粗骨材	空気量 測定誤差	粗骨材量 のばらつき	はかり の感度
変動範囲 (%)	±1%	±1%	±3%	±3%	±1%	±0.5%	±0.01	±0.02	±0.02	±0.5%	±0.25%	±10g 7ℓ

### 3. 1 計量誤差による影響

コンクリート製造時の材料の計量誤差の検討は、通常の生コンプラントで管理される最大のばらつきを考慮し、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の許容範囲の最大値（水量±1%、セメント量±1%、骨材量±3%）の計量誤差が生じた場合の水セメント比の推定値への影響を算定した。また、計量値が正確でも、製造バッチ毎に骨材表面水率に変動が生じ、実質的な計量誤差が生じることから、骨材表面水率の設定誤差の最大が細骨材で±1%、粗骨材で±0.5%生じるものと仮定し、水セメント比を計算した。計算結果を図－1に示す。最も大きな誤差を生じる要因は、粗骨材の計量誤差であり、配合によって差があるが、水セメント比で0.4～0.8%となった。

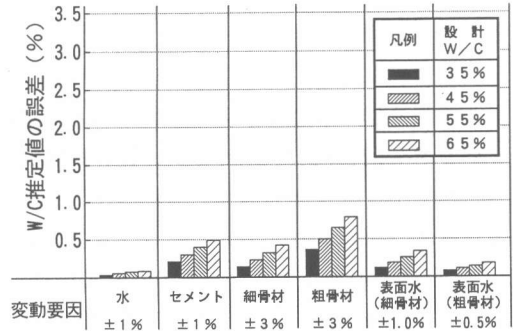
### 3. 2 比重の変動による影響

材料の比重が変動すると実質的に配合も変化し、それに伴い、現場で測定される単位容積質量も変動する。計算に用いた比重の変動量は、通常のプラントで管理され得る変動量としてセメントは±0.01、骨材は±0.02を仮定した。水セメント比の推定誤差を図－2に示す。その結果、粗骨材の比重の影響が最も大きく水セメント比が1～1.8%の誤差を生むことになる。

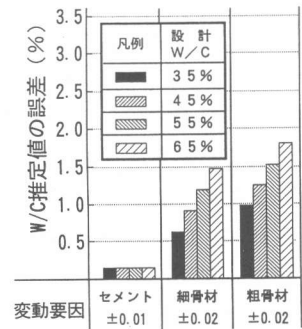
### 3. 3 試験の測定誤差による影響

空気量の測定は、JIS A 1128 空気室圧方法により行い、単位容積質量は空気量試験の容器（容量約7ℓ）を用いて測定する。ここで、同一の試料における空気量の測定誤差を最大±0.5%と設定した。単位容積質量の測定は、感量10gのはかりで測定し、計量器の読みとり誤差を±10gとして計算した。

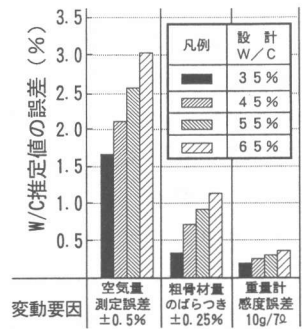
また、採取した試料の粗骨材量のばらつきにより、空気量や単位容積質量の測定値も変動するため、JIS A 1119 によりミキサで練り混ぜたコンクリート中の粗骨材量の差が最大0.5%生じるものとして、±0.25%の粗骨材の変動による影響も検討した。水セメント比の推定誤差を図－3に示す。最も大きな変動要因は空気量の測定値誤差で、水セメント比の誤差として1.7～3.0%であった。



図－1 計量誤差による水セメント比推定値の誤差の比較



図－2 比重誤差による水セメント比推定値の誤差の比較



図－3 測定誤差による水セメント比推定値の誤差の比較

### 3. 4 推定誤差の累積による影響

各変動要因に対する推定誤差を独立事象として重ね合わせ、各配合における推定誤差の合成を行った。なお、計算方法は図-1~3に示す個々の変動要因における水セメント比の推定誤差を $3\sigma_n$ とし、式(6)により求めた。

$$\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_n)^{0.5} \quad (6)$$

計算結果を図-4に示す。これによると、設計水セメント比が小さい配合ほど、水セメント比の推定誤差は小さくなり、水セメント比50%以下の通常のコンクリートでは、95%信頼限界(1.96 $\sigma$ )で $\pm 2\%$ 、100%信頼限界(3 $\sigma$ )で $\pm 3\%$ 程度の推定誤差となるものと考えられる。富配合のコンクリートの推定精度が高くなるため、特に高強度コンクリートや高流動コンクリートに対して有利な手法と考えられる。

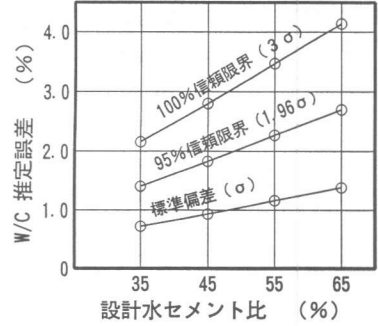


図-4 水セメント比推定誤差の配合による影響

## 4. 室内実験による水セメント比推定精度の検証

### 4. 1 実験概要

空気量と単位容積質量を用いて、フレッシュコンクリートの水セメント比を推定する手法について、材料のばらつきの少ない室内試験において、本質的な推定精度を確認するため、表-1に示す水セメント比35~65%の各配合に対して、目標空気量が、3、4、5、6%の4水準のコンクリートを製造し、推定精度の検証を行った。試験は、各配合について5台の空気量測定器を使用し、JISA 1128 空気室圧力法の注水法で行い、同時に感量10gのはかりで単位容積質量を測定した。圧縮強度試験は、標準養生を行い材齢28日で行った。

### 4. 2 水セメント比推定値の誤差

試験結果のうち、水セメント比35%および55%のケースについての空気量、単位容積質量の測定値と設計水セメント比との関係を図-5に、同じく5回の測定結

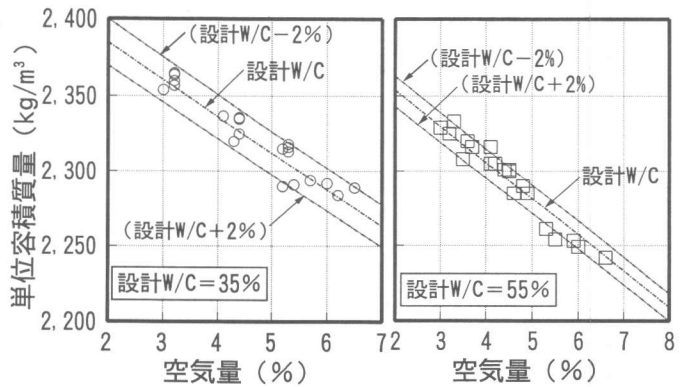


図-5 空気量と単位容積質量との関係(個々の測定値)

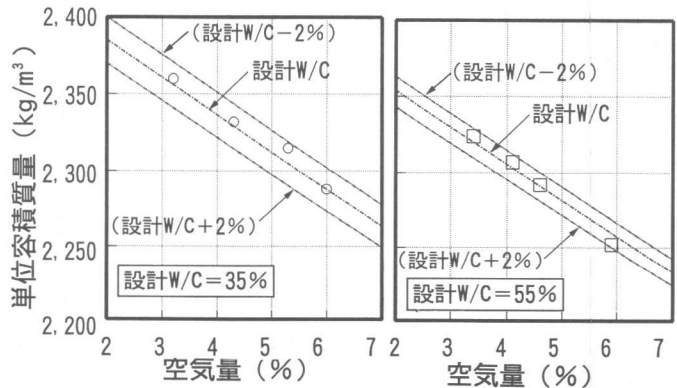


図-6 空気量と単位容積質量との関係(5個の平均値)

果の平均値による設計水セメント比との関係を図-6に示す。図-5に示すように、1回の測定結果では設計水セメント比に対し±2%以上ばらつくものがあるが、図-6に示すように5回の測定結果の平均値では推定精度が向上し、水セメント比で±2%の範囲にある。他のケースについても同様であった。

#### 4.3 水セメント比推定値と圧縮強度

図-7に水セメント比の推定値と圧縮強度との関係を、図-8に同一の試験結果における空気量と圧縮強度との関係を示す。これによると、水セメント比の推定と圧縮強度誤差に対する圧縮強度のばらつきは、空気量の変動による圧縮強度のばらつきの範囲内であることが分かる。

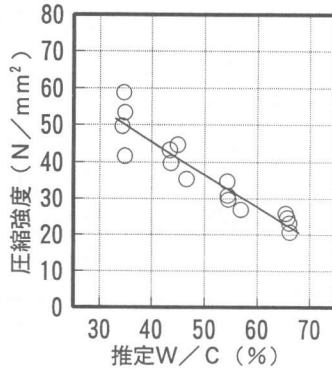


図-7 推定水セメント比と材齢28日圧縮強度

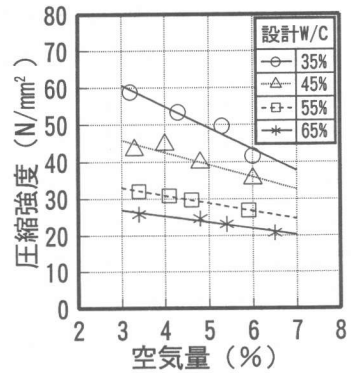


図-8 空気量と材齢28日圧縮強度

### 5. 実機試験による検証実験

#### 5-1. 高流動コンクリートの場合

水セメント比45%、単位セメント量 $367\text{kg/m}^3$ で、空気量の目標値が4.5%、スランプフロー55cm程度の高流動コンクリートを連続して打ち込む現場において、本手法による水セメント比の推定を行った。空気量の測定はJIS A 1128に基づく注水法とし、単位容積質量試験は、同試験の容器を用いた測定とした。はかりは感量10gのものを使用した。本配合に対する水セメント比の推定誤差は4章と同様に計算すると、標準偏差 $\sigma$ は0.86%、95%信頼限界(1.96 $\sigma$ )は±1.7%、100%信頼限界(3 $\sigma$ )は±2.6%である。

図-9に空気量および単位容積質量の測定結果と、それらの結果から水セメント比を推定した結果を示す。図-10は、実測の空気量と単位容積質量との関係をまとめたものである。図中の実線は設計水セメント比の関係式であり、この線に対する許容幅を設定することにより、フレッシュコンクリートの段階で、即座に品質管理に適用することが可能である。測定結果はいずれも本配合における推定誤差の範囲内(3 $\sigma$ は±3%)となった。

#### 5-2 普通コンクリートの場合

水セメント比55%、単位セメント量 $267\text{kg/m}^3$ 、空気量の

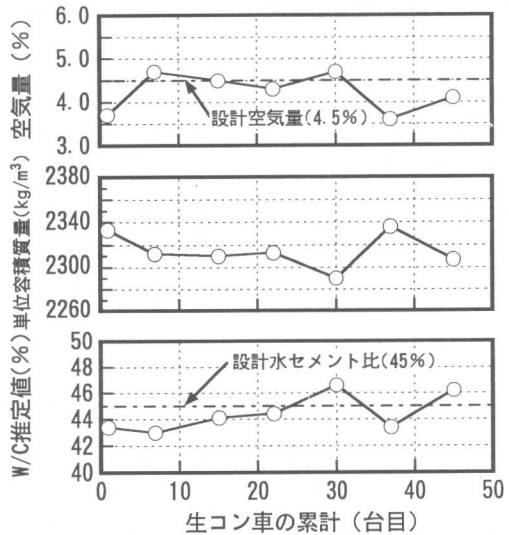


図-9 実機試験による測定結果

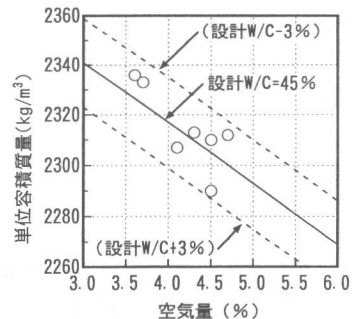


図-10 空気量と単位容積質量

目標値が4.5%で、スランブ18cm程度の普通コンクリートを連続して製造するプラントにおいて、本手法により、水セメント比の推定を行った。

空気量の測定はJIS A 1128に基づく注水法とし、単位容積質量試験は同試験の容器を用い、感量10gのはかりを使用した。また、圧縮強度試験は標準養生とし、材齢は7日、35日で行った。

本配合に対する水セメント比の推定誤差は、4章と同様に計算し、標準偏差 $\sigma$ は1.26%、95%信頼限界(1.96 $\sigma$ )は $\pm 2.5\%$ 、100%信頼限界(3 $\sigma$ )は $\pm 3.9\%$ となった。

図-1.1に空気量および単位容積質量とこれによる水セメント比の推定結果を示す。推定水セメント比は設計値に対して大きい側に偏っており、本配合における推定誤差(3 $\sigma = 55 \pm 4\%$ )の範囲を超えた結果もあった。これらの結果は、細骨材表面水率の設定値が実測値よりも平均で1.0%小さかったことが原因と考えられる。すなわち、設定した水セメント比は58%に相当し、水セメント比の推定誤差の上限は、62%(3 $\sigma$ で $58 \pm 4\%$ )となる。推定結果はほぼその範囲内に収まっており、本手法は、予想される推定誤差のもと、表面水率の設定誤差をとらえたものと考えられる。図-1.2は推定水セメント比に対する圧縮強度試験結果である。水セメント比推定値が大きくなると強度が低下し、本推定手法の妥当性が認められた。

## 7. まとめ

コンクリート構造物の品質保証の上で、現場で打ち込まれるコンクリートの品質を把握することは重要である。そこで、通常の管理試験として行われている空気量と単位容積質量の測定結果を用いて、配合条件が一定のフレッシュコンクリートの水セメント比を推定する手法を提案した。

本手法による水セメント比の推定値に与えるコンクリートの材料、製造、試験の変動要因を、同一配合内で分析した結果、富配合のコンクリートの推定精度は高く、水セメント比が35~65%の範囲で2~4%程度の誤差となった。室内実験では、同範囲の水セメント比の推定値は、複数回の平均値により、水セメント比で2%以下の誤差となり、実機試験においては、配合により定まる推定誤差と同等の試験結果が得られ、圧縮強度との対応から本推定手法の妥当性が認められた。

## 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. 11-1, pp159-164 1989. 6
- [2] (社) 日本コンクリート工学協会編: コンクリート品質の早期判定指針 1985. 3
- [3] 相原功, 若松岳, 平田隆祥: 空気量と単位容積質量の測定によるフレッシュコンクリートの水セメント比管理, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp230-231 1996. 8

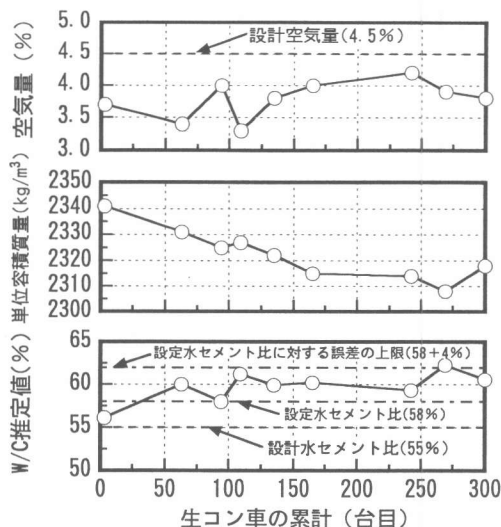


図-1.1 実機試験による測定結果

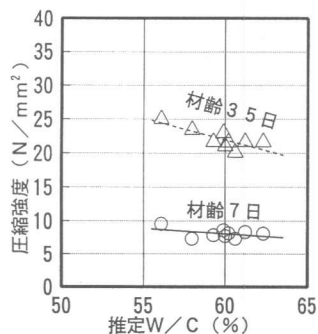


図-1.2 水セメント比推定値と圧縮強度