

論文 フレッシュコンクリートの単位水量迅速推定法の提案

片平 博^{*1}・河野 広隆^{*2}

要旨：フレッシュコンクリートの単位水量の迅速推定法として、乾燥炉を用いた加熱乾燥法とエアメータを用いた単位容積質量法をとりあげ、室内実験と現場実験を実施した。この結果、高い推定精度を得るには乾燥炉法が適していること、エアメータ法は推定精度はやや落ちるものの測定が容易であることが明らかとなった。この結果を受けて、抜き打ち的な品質検査には加熱乾燥法を、日常の品質管理にはエアメータ法を用いる品質管理法について提案した。

キーワード：フレッシュコンクリート、単位水量、加熱乾燥、エアメータ、品質管理

1. はじめに

コンクリートの強度管理は一般に材齢 28 日の圧縮強度試験で行われる。このため、この時点でコンクリートの品質に欠陥が認められても、すでに構造物の建造が進捗しており、構造物の大規模な補修や撤去は困難である。このため、コンクリートの品質を打設直前に迅速に判定できる試験方法の確立が求められている。

コンクリートの強度は主に水セメント比によって決定される。このうち単位セメント量は生コンプラントの計量装置の精度の向上や、自動計量記録装置の普及によって比較的容易に確認できる。一方、単位水量の把握は容易ではない。単位水量はコンクリート練り混ぜ時に投入される計量水量に骨材の表面水量を加えたものであるが、骨材の表面水量は変動しやすく、その真の量を的確に求めることが困難なためである。また、骨材粒度の微妙な変化がコンクリートのフレッシュ性状に与える影響を補正する目的から、骨材の表面水量の値を人為的に操作して投入水量を修正することもあり、練り混ぜに用いられた真の単位水量は明確でない場合がある。このため、

単位水量を正確に求めるための試験法の確立が重要である。

2. 目的

フレッシュコンクリートの単位水量を推定する方法としてこれまで数多く提案されてきた試験方法¹⁾²⁾³⁾の中から、原理が比較的単純で誤差要因が少なく、現場への適応性が高いと考えられる方法として乾燥炉を用いた加熱乾燥法（以下、乾燥炉法という）と、エアメータを用いた単位容積質量法（以下、エアメータ法という）をとりあげ、その推定精度と特性について整理する。また、各測定手法の特性を生かし、現場において有効な品質管理法について提案することを目的とする。

3. 室内実験

3.1 コンクリート配合および材料物性

コンクリート配合は、まず、表-1 に示すように粗骨材の最大寸法を 20mm とし、単位水量 153 ～ 173kg/m³ の範囲で 5 つの中強度の配合（水セメント比 40 ～ 67 %）と、1 つの高強度の配合（水セメント比 25 %）を設定した。次に、中強度の各配合に対して水量のみを意識的

*1 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室 研究員（正会員）

*2 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室 室長 工修（正会員）

表－１ コンクリートの配合

ケース	骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				コンクリート単位容積質量(kg/m ³)		備 考
						水	セメント	細骨材	粗骨材	含Air	除Air	
I	20	18	50	44	5.5	174	347	760	993	2275	2407	中強度の配合 左記の基本配合に対して、 セメント水比が-0.125,-0.25, +0.125だけ変化するように 水量を操作した配合を設定
II	20	12	50	44	5.5	164	328	778	1017	2286	2419	
III	20	5	67	48	4.5	154	231	912	1015	2312	2421	
IV	20	5	50	44	5.5	154	307	797	1043	2301	2434	
V	20	5	40	42	5.5	154	384	735	1042	2315	2449	
VI	20	26	25	43	2.0	160	640*	693	946	2440	2489	高強度の配合

*は低熱ポルトランドセメント、他の配合は普通ポルトランドセメント

表－２ コンクリート材料の物性

セメント	普通ポルトランドセメント		密度：3.22g/cm ³ 比表面積：3,320cm ² /g
	低熱ポルトランドセメント		密度：3.21g/cm ³ 比表面積：4,070cm ² /g
水	水道水		密度：1.00g/cm ³
細骨材	大井川産河床砂		密度：2.61g/cm ³ 吸水率：1.06 %
粗骨材	笠間産 硬質砂岩	粒径 5-13mm	密度：2.67g/cm ³ 吸水率：0.72 %
		粒径 13-20mm	密度：2.67g/cm ³ 吸水率：0.48 %

に増加（または減少）させた配合を設定した。
設定した配合は合計で 20 配合である。

また、コンクリート材料の物性を表－２に示す。この中で、セメントの密度については、JIS A 5201 に鉱油を使用した測定法が規定されているが、表－２には鉱油の代わりに水を使用した場合の値を示している。これは実際の練り混ぜで水と混合されたときのセメントの見かけの密度は JIS A 5201 で得られる値とは若干異なるため、単位容積質量から単位水量を推定する場合の誤差要因となるためである。

3.2 実験方法

3.2.1 乾燥炉法の概要

乾燥炉法はフレッシュコンクリート中の水分を加熱乾燥によって完全に蒸発させ、乾燥前後の質量差から単位水量を推定する方法である。ただし、フレッシュコンクリート中の水分としては単位水量の他に骨材中の吸水量があるため、乾燥によって減少した質量から骨材中の吸水量を差し引いた残りが単位水量となる。

乾燥炉は蓄熱版を耐熱レンガで覆った単純な構造のもので、実験では炉内温度を 600℃、乾燥時間を 10 分間とし、骨材中の水分まで完全に蒸発させることとした。

乾燥炉法に供する試料としては、コンクリー

ト試料(1,000cc)を直接用いる方法と、ウェットスクリーンモルタル(600cc)を用いる方法を比較した。なお、コンクリート試料を直接乾燥する場合には粗骨材採取量のバラツキの影響が無視できないため、乾燥後の試料をフルイ上で水洗いすることで粗骨材を抽出し、採取量の変動の影響を補正した。

3.2.2 エアメータ法の概要

コンクリートの配合が変化すればその単位容積質量も変化する。この原理を利用して単位容積質量から単位水量を推定する。

表－１のコンクリート配合の中で、単位水量が異なる I、II、IV 配合を比較すると、単位水量が 10kg/m³ 変化するごとにコンクリートの単位容積質量は 11～15kg/m³ 程度変化している。これは水の密度が他の構成材料の密度より著しく小さいためであり、単位水量の変化はコンクリートの単位容積質量に反映される。

また、表－１にはコンクリートの単位容積質量の値として、空気量を含む値と、空気量を除いた値を示しているが、空気量がコンクリートの単位容積質量に与える影響は非常に大きい。

このため、コンクリートの単位容積質量から単位水量を推定する場合には、コンクリート試料の容積、質量に加えて空気量を精度良く測定

する必要がある。エアメータはこれら全ての測定に適した試験機器といえる。本来は空気量を測定するための装置であるが、容器の容積が既知であるから、これに加えて試料質量を測定するだけでコンクリートの単位容積質量を簡易に求めることができる。

実験に使用するエアメータは作業性に優れ、広く普及しているワシントン型エアメータとした。測定方法は JIS A 1128(圧力による空気量測定法)に示される注水法に従って空気量を測定し、容器に詰めたコンクリート質量と、注水時の注水質量を測定した。コンクリートの容積はエアメータの容器容積と基本的に一致すると考えて良いが、注水質量を測定することでコンクリート容積をさらに精度良く求める方法(以下、この方法を注水補正という)を試みた。

また、測定終了後のコンクリート試料は 5mm フルイ上で洗い出しを行い、粗骨材採取量の変動の影響についても調査した。

3.2.3 実験ケース

上記の各方法により、3.1 項で決定した 20 配合のコンクリートに対し、練り上がり直後、1 時間経過後、2 時間経過後に測定を実施し、単位水量を推定した。

3.3 単位水量の推定式

3.3.1 乾燥炉法の推定式

単位水量以外の材料が示方配合通りに配合されていると仮定し、以下の推定式を提案した。

(1)コンクリート試料を乾燥する場合

$$W = (M_1 - M_2 - G_1 \times \frac{Q_g}{100 + Q_g}) \times \frac{M_c - W_w - W_s - M_g}{M_{m2}} - W_s \quad (1)$$

ここに、

W : 推定単位水量 (kg/m³)

M_1 : 加熱乾燥前の試料質量 (kg)

M_2 : 加熱乾燥後の試料質量 (kg)

G_1 : 試料中の粗骨材の表乾質量 (kg)

Q_g : 粗骨材の吸水率 (%)

M_c : 配合上のコンクリートの単位容積質量 (kg/m³)

W_w : 配合上の単位水量 (kg/m³)

W_s : 配合上の細骨材の吸水量 (kg/m³)

M_g : 配合上の粗骨材量 (kg/m³)

M_{m2} : 加熱乾燥後のモルタル質量 (kg)

$$M_{m2} = M_2 - G_1 \times (1 - \frac{Q_g}{100 + Q_g}) \quad (2)$$

(2)ウェットスクリーンモルタルを加熱乾燥する場合

$$W = (M_1 - M_2) \times \frac{M_c - W_w - W_s - M_g}{M_2} - W_s \quad (3)$$

3.3.2 エアメータ法の推定式

いま、空気量を除いたコンクリート試料の単位容積質量を r_o とし、この配合の水量が本来の単位水量より W' だけ多かったとする。この W' は次式で表される。

$$W' = \frac{r_o \cdot (1,000 - \text{Air}) - 1,000 \times r_c}{1,000 - r_o} \quad (4)$$

ここに、

W' : 余剰水量 (kg)

r_o : 実験から得られる空気を含まない試料の単位容積質量 (kg/m³)

r_c : 配合上の 1 m³ 当たりの質量 (kg/m³)

Air: コンクリート配合上の空気量 (g/m³)

式 (4) の値に配合上の単位水量を加えた値を推定単位水量とする。

なお、式 (4) 中の r_o の算出方法は以下のとおりである。

$$r_o = \frac{M_1}{V_1(1 - \text{Air} / 100)} \quad (5)$$

ここに、

M_1 : コンクリート試料の質量 (g)

V_1 : コンクリート試料の容積 (ℓ)

V_1 = 試料容器の容積

または $V_1 = (V_a - W_1)$

V_a : 蓋をかぶせた容器の全容積 (ℓ)

W_1 : 注水量 (ℓ)

Air: 測定空気量 (%)

3.4 実験結果

各手法によって得られる推定単位水量を真の単位水量に対する百分率で示した結果を図-1 に示す。ここで、乾燥炉法(コンクリート試料)の高強

度配合の結果を除くと、いずれのケースでも単位水量の推定値は練上りからの時間の経過に伴って徐々に低下していく傾向を示しているが、これは過去の実験結果³⁾から放置中の水分蒸発の影響と考えられる。時間経過に伴うデータのバラツキ幅の変動は見られない。

各手法の推定精度と特徴を以下に述べる。

3.4.1 乾燥炉法(コンクリート試料)の結果

図-1 (1)から分かるように、中強度配合と高強度配合とでは結果が異なる。

中強度配合については、今回試験した推定手法のなかで最も高い推定精度を示した。練り上がり直後の試験結果では、真の単位水量に対する推定精度は概ね $\pm 5 \text{ kg/m}^3$ の範囲であった。

高強度配合については、時間経過とともに推定単位水量が著しく増大する傾向を示した。これは高強度配合では加熱乾燥後のセメントペーストの骨材への付着力が高く、洗い出しによる粗骨材の分離が困難なためである。

作業時間としては、乾燥時間は10分程度で

十分であるが、乾燥後の粗骨材の洗い出し作業等を含めると30分程度は必要であった。

3.4.2 乾燥炉法(ウェットスクリーンモルタル試料)の結果

図-1 (2)から分かるように、中強度配合についての推定精度は低く、練り上がり直後の試験でも、推定水量は真の単位水量に対して平均で 10 kg/m^3 程度低めに出ており、データのバラツキの範囲も $0 \sim 20 \text{ kg/m}^3$ の範囲と大きい結果となった。このことから、中強度配合のウェットスクリーンモルタルの性状は、コンクリート中の本来のモルタルの性状とは必ずしも一致しないものと考えられる。

これに対して高強度配合についての推定結果は比較的良好で、練り上がり直後の単位水量の推定誤差は 6 kg/m^3 程度であり、時間の経過に起因した大きな測定誤差も見られない。この理由としては、高強度配合では混和剤に高性能AE減水剤を使用して高流動化を図っており、この高い分散効果によって、均質化したウェットスクリーンモルタルが採取できたことが考えられる。

作業時間としては、ウェットスクリーニングと乾燥時間を合わせて15分程度であった。

3.4.3 エアメータ法(注水補正あり)の結果

図-1 (3)に示すように、(注水補正なし)に比較すると(注水補正あり)の推定精度は高く、

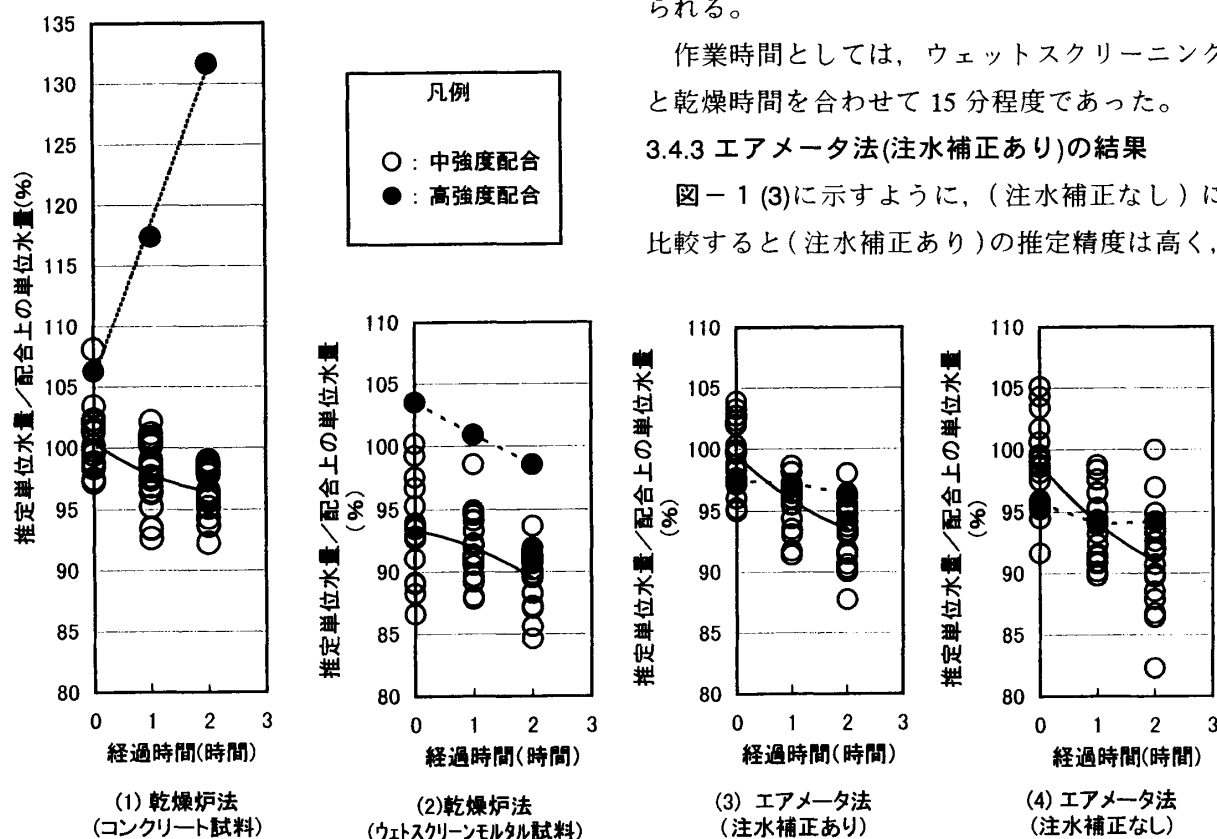


図-1 各推定手法によって得られる推定単位水量

練り上がり直後の試験結果では、真の単位水量に対する推定精度は概ね $\pm 7 \text{ kg/m}^3$ の範囲であった。

また、図-2に示すように、エアメータ法は乾燥炉法に比較して容積が7リットルと大きいために、粗骨材採取量のバラツキの範囲は小さく、粗骨材量の補正の有無が単位水量推定精度に与える影響はほとんど認められなかった。

測定作業としては、空気量の測定作業に加えて2回の質量測定を行うだけであり、この質量測定に要した時間は1～2分であった。

3.4.4 エアメータ法(注水補正なし)の結果

図-1(4)に示すように、(注水補正あり)に比較して推定精度は低下しており、練り上がり直後の試験結果では、真の単位水量に対する推定誤差は概ね $\pm 10 \text{ kg/m}^3$ の範囲であった。

測定作業としては、空気量の測定作業に加えて質量を1回測定するだけであり、この質量測定に要した時間は1分以内であった。

4. 実施工での単位水量推定法の適用例

実施工における生コンクリートの単位水量の推定に乾燥炉法とエアメータ法を適用した例を図-3に示す。ここでは、乾燥炉法は約2 kgのコンクリート試料を加熱乾燥し、乾燥後の試料を洗い出して粗骨材量の補正を実施した。また、エアメータ法は無注水法によって空気量を求めるとともに、質量を測定した。なお、図-3には材齢28日の圧縮強度から推定した単位水量の値を合わせて示した。この値は生コン工場での実績から得られる強度と水セメント比との関係式を用いて求めたものである。

示方配合上の単位水量は 135 kg/m^3 である。練上りから現場到着までは30分以内で、その間の水分蒸発の影響は少ないと考えられる。

乾燥炉法から得られる推定単位水量の値は圧縮強度から得られる推定単位水量に比較して一様に約 10 kg/m^3 程度高いものの、双方のグラフの増減傾向は非常に良く一致している。推定単位水量の絶対値として、どちらの推定値が正し

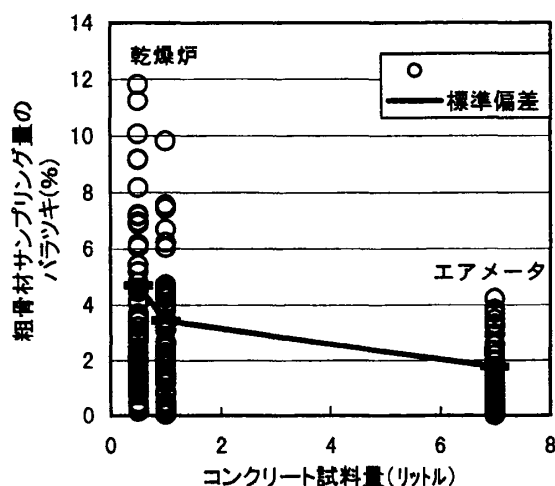


図-2 試料量と粗骨材採取量のバラツキの関係

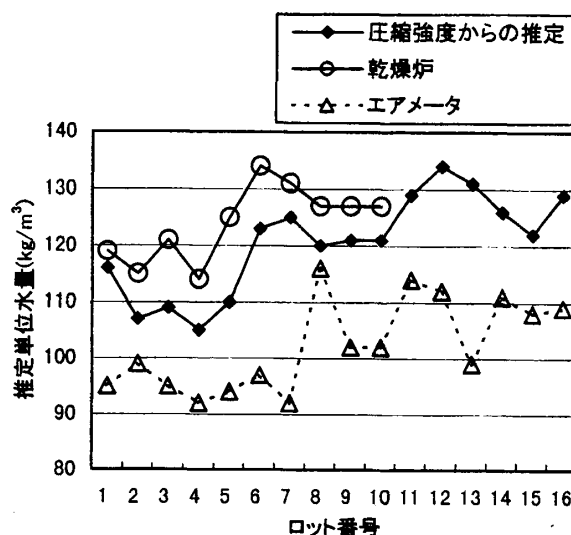


図-3 実施工における単位水量推定実験の例

いかを検証することはできないが、乾燥炉法による推定値が生コンクリートの単位水量の増減を的確に捉えていることは確かである。

一方、エアメータ法から得られる推定単位水量の値は、他の2つの推定値からは大きくかけ離れ、かなり少ない推定単位水量となった。この理由としては、エアメータ法はコンクリートの単位容積質量から単位水量を推定する方法であるが、コンクリート質量の大半は骨材が占めており、単位水量の占める割合はわずかであることから、骨材密度のわずかな測定誤差が、推定単位水量に大きな影響を与える。このため、エアメータ法は単位水量の絶対値を求める方法としては必ずしも適した方法とはいえない。た

表-3 各試験法の得失

測定方法		推定精度		作業時間	備考
		中強度配合	高強度配合		
乾燥炉法	コンクリート試料	高い	低い	30分	電源が必要 炉の余熱、冷却時間が必要
	ウェットスクリーンモルタル試料	低い	高い	15分	
エアメータ法	注水法(注水補正あり)	やや高い		2分	絶対値の推定には不向き
	無注水法(注水補正なし)	やや低い		1分	

表-4 フレッシュコンクリートの単位水量の品質管理法の提案

位置づけ	対象	試験方法	試験の頻度
品質検査 (抜き打ち検査)	中強度配合	乾燥炉法(コンクリート試料)	随時
	高強度配合	乾燥炉法(ウェットスクリーンモルタル試料)	随時
日々の品質管理	重要構造物	エアメータ法(注水法)	空気量測定頻度と一致
	一般構造物	エアメータ法(無注水法)	空気量測定頻度と一致

だし、骨材の密度が急激に変動する可能性は低いので、バッチ間の単位水量の変動を相対的に捉える方法として有効と考えられる。図-3においても、データにバラツキはあるものの、前半の1～5バッチの単位水量は少なく、後半にいくに従い単位水量が増加している傾向を、概略的に捉えている。

なお、実施工では骨材の計量誤差など、室内試験には無い誤差要因が含まれ、これらが単位水量の推定精度に与える影響については今後の検討課題である。

5. 現場での合理的な単位水量測定法の提案

上記の各試験結果から各試験方法の得失を整理すると表-3のようになる。これから判るように、現状では、精度の高い推定を行うにはそれなりの装置と手間(時間)が必要である。一方、高い推定精度は期待できないものの、エアメータ法のような手間のかからない方法であれば、日常の施工管理に適応できる可能性が高い。

そこで、これらの各手法の得失を考慮し、抜き打ち的な品質検査と日常の施工管理に分けて、表-4に示すような品質管理法を提案する。

6. まとめ

- (1) 乾燥炉法は単位水量を比較的精度良く推定することが可能である。
- (2) 中強度の配合に対しては、コンクリート試料を加熱乾燥し、乾燥後の試料をフルイ上で

洗い出すことで粗骨材量を補正する方法が適している。

- (3) 高強度の配合に対してはウェットスクリーンモルタルを加熱乾燥する方法が適していると考えられる。
- (4) エアメータ法は空気量の測定の際にコンクリート質量を測定するだけで、手軽に単位水量の推定が可能である。
- (5) エアメータ法では注水法により空気量を測定し、コンクリート試料容積を注水量で補正することで、単位水量の推定精度を高めることができる。
- (6) エアメータ法は単位水量の絶対値を求める方法としては精度が低く、バッチ間の相対的な変動を捉えるうえで有効である。
- (7) 以上の見知をもとに、抜き打ち的な品質検査には乾燥炉法を、日常の品質管理にはエアメータ法を用いる品質管理法について提案した。

「参考文献」

- 1)コンクリート品質の早期判定指針,(社)日本コンクリート工学協会,1985年
- 2)小林茂敏,森濱和正,高橋弘人,田村久:コンクリートの品質管理に関する調査試験報告書
(1),土木研究所資料第2736号,1989年2月
- 3)河野広隆,森濱和正,高橋弘人:コンクリートの品質管理に関する調査試験報告書(2),土木研究所資料第2979号,1991年3月