

エアメータを利用したフレッシュコンクリートの単位水量推定方法(その2)

単位水量迅速測定装置の開発と算定精度の検証

近松 竜一 中村 博之
花田 貴史 高橋 敏樹

Research on Water Content Estimation by Air Meter (Part2)
- Development of Device for Rapid Measurement of Water Content
and Verification of Calculation Accuracy -

Ryuichi Chikamatsu Hiroyuki Nakamura
Takashi Hanada Toshiki Takahashi

Abstract

A device is developed for precisely calculating the water content and air content in a unit mass of fresh concrete, and the influence of various error factors on the calculated result, and the estimated precision of water content are verified. It is thus shown that a change in the aggregate density and the measurement value has a large influence on the calculated water content error. The air content was measured with high precision, and it became clear that the water content could be calculated with an error of about $\pm 2 \text{ kg/m}^3$ by precisely determining the unit capacity mass. Moreover, this method had a short measurement time, which confirmed that its application was expensive as a rapid on-site water content measurement device.

概要

フレッシュコンクリートの単位容積質量と空気量から単位水量を精度良く測定する装置を開発し、各種の誤差要因が測定結果に及ぼす影響ならびに単位水量の推定精度について検証した。その結果、骨材の密度や計量値の変動が単位水量の測定誤差に及ぼす影響が大きいこと、空気量を精度良く測定し、単位容積質量を正確に求めることで単位水量を約 $\pm 2 \text{ kg/m}^3$ の精度で算定できることが明らかとなった。また、この方法は、測定時間が短く、現場における迅速な単位水量測定装置として適用性が高いことを確認した。

1. はじめに

コンクリートの構成材料のうち、特に単位水量がコンクリート構造物の強度および耐久性を左右する重要な要因であることは周知のとおりである。単位水量の測定に関しては、既に各種の方法が提案されているものの、荷卸し時の検査として実施されることはほとんどなかった。これは、現場での適用を考えた場合、いずれの方法も精度や迅速性、コストなどの点で十分に満足するものとなっていないためであり、単位水量を精度良く、簡便かつ迅速に測定できる試験方法の確立が要望されている。

これまでに提案されているコンクリートの単位水量測定方法の一覧を Table 1 に示す。

これらの測定方法を原理別に分類すると、構成材料の配合比、質量や容積の差を利用する方法^{1) 2) 3) 4)}、試料中の水分を蒸発させて抽出する方法^{5) 6) 7)}、試料中に試薬を添加してその濃度変化を求める方法^{7) 8) 9)}、中性子線、静電容量、赤外線方式等の水分計を応用した方法

など^{10) 11) 12)}に分類される。

また、測定試料の種類としてモルタルを用いる場合とコンクリートを用いる場合に大別できる。モルタルの場合には、コンクリートをウェットスクリーニングして試料を採取する。この際、スクリーニングの方法によっては各材料の構成割合が変動し、測定誤差を生じる可能性がある。一方、コンクリートをそのまま試料とする場合にはサンプル量が測定誤差に大きく影響する。試料の量が少ないと粗骨材とモルタルの構成比がばらつき、測定誤差が大きくなる。測定精度に関しては $\pm 2 \sim 10 \text{ kg/m}^3$ あるいは $\pm 2 \sim 5\%$ 程度とされている。また、測定時間については約 1 分程度とほぼリアルタイムに近いものから 30 分以上を要する方法もある。

本論文では、まず単位容積質量と空気量から単位水量を精度良く測定する装置の概要について紹介する。また、各種要因が単位水量の測定結果に及ぼす影響を明らかにするとともに、新たに開発した装置の測定精度を実験的に検証した結果について示す。

Table 1 コンクリートの単位水量測定方法
Testing Method of Water Content

試験方法		使用器具類	試料量	測定精度	測定時間
構成材料比・質量差・容積差法	絶対容積の差による方法 ¹⁾	一定容器	ウェットスクリーニングモルタル: 400g		
	空気中質量と水中質量の差による方法 ²⁾	三角フラスコ	ウェットスクリーニングモルタル: 200ml	3%	10分
		水槽, かご	コンクリート	$\pm 4 \sim 6 \text{ kg/m}^3$	15分
	空気量試験による方法 ^{3), 4)}	ワシントン型エアメータ	コンクリート: 約16kg	$\pm 5 \sim 10 \text{ kg/m}^3$	約5分
水抽出法	一般加熱乾燥法 ⁵⁾	ガスコンロ, 電熱器, 赤外線乾燥器	コンクリート: 1L	$99 \pm 2 \%$	20~30分
	高周波誘電加熱乾燥法 ⁶⁾	電子レンジ	ウェットスクリーニングモルタル: 300~600g	-5~ -0.5%	10~20分
	減圧乾燥法 ⁷⁾	減圧乾燥装置	ウェットスクリーニングモルタル: 400g	約4kg	20分
		減圧乾燥装置	コンクリート: 約5L	$\pm 2 \text{ kg}$	約40分
試薬濃度差法	アルコール比重計法 ¹⁾	アルコール比重計	コンクリート: 約1L	$\pm 5 \%$ 程度	約20分
	塩分濃度差法 ^{8), 9)}	塩分測定器	コンクリート: 約2L	$\pm 3 \%$	20分
		電量滴定器	コンクリート: 約2kg	1.2%	20分以内
		滴定器	コンクリート: 7L	約4L/m ³	20~90分
水分計法	静電容量測定法 ¹⁰⁾	静電容量型水分計	ウェットスクリーニングモルタル: 330ml	$\pm 2.9 \sim 3.4 \%$	10分
	中性子測定法 ¹¹⁾	R I 水分計	コンクリート連続測定	$2.7 \sim 3.2 \text{ kg/m}^3$	120秒
	赤外線測定法 ¹²⁾	光ファイバー式赤外線水分計	コンクリート: 500cc	$\pm 2 \text{ kg}$	40秒

2. エアメータ法の概要

2.1 測定方法の原理

各材料の計量値が設定値と異なる場合、コンクリートの単位容積質量に変化が生じる。本測定方法では、この単位容積質量の設定値と実測値の差を利用してコンクリートの単位水量を求める。ただし、単位容積質量はコンクリート中の空気量の増減によっても変わるので、単位水量を正確に求めるには空気量の影響を補正する必要がある。なお、この方法は、単位容積質量と空気量測定にエアメータを用いることからエアメータ法と称している。

コンクリート材料の計量においては、細骨材中の表面水の変動が主な計量誤差の要因と考えられる。すなわち、表面水を含む細骨材の量として、見かけ上は設定どおりでも、細骨材と表面水の割合は必ずしも設定どおりに計量されていない可能性がある。

本測定方法における前提条件を以下に示す。

- (1) 単位水量の増減は、細骨材表面水率の設定値と実測値との違いに起因する。
- (2) セメント、粗骨材の計量値は正確である。
- (3) 使用材料の密度は既知である。
- (4) 測定試料は、コンクリートの代表サンプルである。

実際には、セメントの計量時にはある程度の測定誤差が生じ、粗骨材の計量に関しても表面水率の設定誤差により表面水量の増減が生じる場合もあり得る。また、単位水量の測定に用いる試料についても必ずしも代表値と異なる可能性もあるが、本測定方法ではこれらの誤差はないものと仮定して、細骨材表面水率の見込み違いを変動要因として単位水量を算定する。

2.2 測定手順および装置

2.2.1 測定前の事前検討項目 まず、測定前に予めエアメータ装置自体の容積と質量を測定する。また、骨材内部の空隙の影響を補正するため、JIS A 1128 に準拠して骨材修正係数を求める。

JIS R 5201「セメントの物理試験方法」では、セメントの密度の測定には通常は鉱油を用いる。しかし、コンクリートの単位容積質量を正確に測定するには、鉱油の代わりに水で試験した値をセメント密度として用いる必要がある¹³⁾。以下、水を用いて測定したセメントの密度を湿潤密度と呼称する。なお、セメントの水和反応が測定結果に及ぼす影響については、実用上ほとんど無視できることが実験により確認されている。

2.2.2 測定手順 エアメータ法による単位水量測定手順を Fig. 1 に示す。まず、エアメータ中の試料の質量を測定する。その後、蓋と試料表面との空間部分に水を満たした装置の質量を測定する。これらの結果より単位容積質量を算出する。次に、空気量試験を「JIS A 1128」の注水法に準じて測定する。単位水量は、これらの単位容積質量と空気量の測定値を用いて算定できる。測定に要する時間は約5分以内で迅速に測定できる。

2.2.3 単位水量測定装置の概要 単位容積質量および空気量の測定精度を高めるために製作した単位水量測定装置を Photo 1 に示す。本装置は、容器内の試料の圧力を測定するエアメータ、質量を測定する台はかりおよびこれらの測定結果から空気量と単位容積質量を演算する演算ユニットから構成される。

圧力の計測は、従来のブルトン管式に代えてデジタル式圧力計を用いている。圧力計と台はかりによる測定デ

ータは、装置本体とは独立した演算ユニットに無線で送信され、ディスプレイ画面上に空気量と単位容積質量の測定結果が表示される。

単位水量測定装置は、JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」と同じ原理から空気量を測定する。ただし、ワシントン型エアメータは、初圧力を 100kPa に調整して圧力の減少量から空気量を直読するのにに対し、単位水量測定装置は、デジタル式圧力計の測定値を演算ユニットに送信し、圧力と空気量の関係を演算により求める。

すなわち、任意の初圧力に対する作動弁開放後の平衡圧力と気泡量との関係を演算ユニットに設定しておき、初圧力と平衡圧力から気泡容積を算定し、これを試料容積に対する百分率として、式(1) により空気量を求める。したがって、初圧力を一定に調整する必要はない。

$$A_1 = \frac{V_a}{V_c} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 V_a ：気泡容積(cm^3)

V_c ：コンクリート試料容積(cm^3)

最小分解能が 0.1kPa の圧力計を内蔵した単位水量測定装置を用いた場合、試料容積 7L に対して、理論上は $\pm 0.05\%$ の精度で空気量の測定値が得られる。

3 単位水量測定結果に及ぼす各種要因の影響

3.1 はかりの誤差と空気量測定精度の影響

エアメータ法の場合、単位水量の測定精度ははかりの最小秤量と空気量の測定精度の影響を受ける。そこで、まず計測機器の性能による単位水量の測定誤差について試算する。なお、測定誤差の検討には、コンクリートの試算例として、水セメント比 55.0%，細骨材率 43.0%，単位水量 155kg/m^3 ，セメントの密度 3.16g/cm^3 ，細骨材の表乾密度 2.59g/cm^3 ，粗骨材の表乾密度 2.66g/cm^3 を用いた。

エアメータ法では、単位容積質量を算定するために、質量を 2 回測定する。1 回目の測定は試料質量の測定誤差、2 回目の測定では、試料容積の測定誤差がそれぞれ単位容積質量の算定に影響を及ぼす。そこで、単位容積質量を算定するための質量と容積の測定誤差が単位水量の測定結果に及ぼす影響を試算した。

試算結果を Table 2 に示す。測定試料の質量より容積の方が単位水量の誤差に影響し、わずか 1cc の誤差により単位水量が 0.3kg/m^3 変動すると試算される。

各計測装置の性能に起因する単位水量の測定誤差を表示分解能として取り扱った場合、はかりとエアメータの組合せから単位水量の測定誤差を求めた結果を Fig. 2 に示す。一例として、空気量の測定精度が 0.1%，最小表示能力が 1g のはかりを使用した場合、理論上はコンクリートの単位水量を $\pm 2\text{kg/m}^3$ 以内の精度で測定することができる。

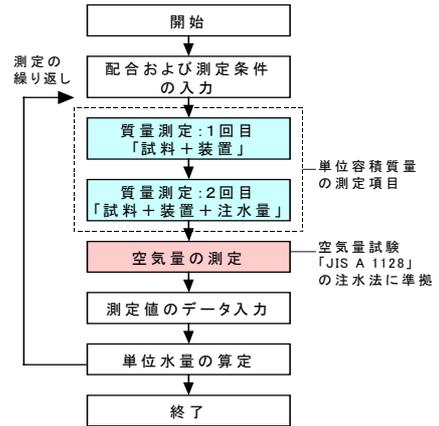


Fig. 1 単位水量の測定手順
Measurement Process of Water Content



Photo 1 単位水量測定装置
Water Content Measurement Device

Table 2 装置の性能が単位水量測定結果に及ぼす影響
Influence of Device Performance on Water Content Measurement Result

誤差要因	変動量に対する水量算定誤差
試料質量の測定	+1g -0.1kg/m ³
試料容積の測定	+1cc -0.3kg/m ³
空気量の測定	+0.1% -1.6kg/m ³

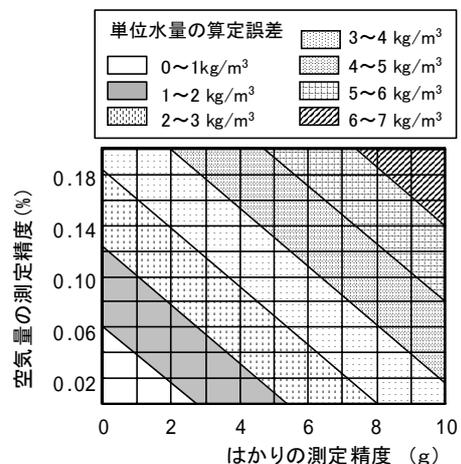


Fig. 2 はかりと空気量の測定精度の組合せによる
単位水量の算定誤差
Water Content Error by Combination of Measurement Precision of Balance and Air Content

3.2 材料の密度および計量誤差の影響

コンクリートを構成する各材料の密度の変動が単位水量の測定誤差に及ぼす影響を Table 3 に示す。水および粗骨材の密度の変動による影響が大きく、 $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ の変動により単位水量の測定結果に約 $2.4\text{kg}/\text{m}^3$ の誤差が生じることになる。

また、コンクリートの製造段階で材料計量に誤差が生じた場合、計画と異なった配合になる。そこで、各材料の計量誤差に起因する単位水量の誤差を試算した。各材料ともに計量誤差が JIS A 5308 に規定されている許容範囲内であれば、単位水量の測定誤差として約 $\pm 2\text{kg}/\text{m}^3$ の範囲内に収まるものと計算される。

材料の計量値が JIS A 5308 に規定された許容範囲内で変動した場合に単位水量の誤差として算定される変動範囲を試算した。なお、ここでは、密度も併せて変動すると仮定し、各材料の密度をそれぞれ $\pm 0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 変動させた場合についても試算した。

示方配合上の単位水量とこれら各種要因の変動から算定される単位水量の関係を Fig. 3 に示す。単位水量は、計量誤差の影響により約 $\pm 5\text{kg}/\text{m}^3$ 、さらに各材料密度の設定誤差による影響を含めると最大で約 $\pm 12\text{kg}/\text{m}^3$ の誤差を生じる可能性があるとして試算される。

4. エアメータ法による単位水量測定精度の実験的検証

4.1 表面水率の設定誤差による単位水量の変動

単位水量が理論どおり求められることを確認するため、使用材料の計量誤差およびサンプリング誤差が生じない条件でコンクリートを製造し、単位容積質量と空気量をもとに単位水量を算定した。使用材料を Table 4 に示す。エアメータ法では、細骨材表面水率の見込み違いを単位水量の変動要因とするので、表面水の設定値と実測値との差が、測定結果に再現されることを検証した。

水セメント比が 55% で、単位水量が異なる 3 種類のコンクリート配合 (Table 5) を対象とし、細骨材表面水率の設定値を故意に $\pm 1\%$ 増減させた場合に単位水量が理論どおり測定されることを確認した。試験結果を Fig. 4 に示す。単位水量の測定値は、事前の設定値とほぼ一致した結果となり、本測定装置により理論どおり単位水量を測定できることが確認された。

Table 4 使用材料の物性値
Properties of Concrete Materials

材料	記号	種類	密度 (g/cm^3)	物性
セメント	C	普通ポルトランド	3.22	比表面積: $3270 \sim 3300\text{cm}^2/\text{g}$
混和材	LF	石灰石微粉末	2.71	比表面積: $5600\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	陸砂	2.61	吸水率: $1.82 \sim 1.91\%$
	G	砕石	2.65	吸水率: $0.68 \sim 0.70\%$
粗骨材	Gb	20ガラスビーズ	2.50	吸水率: 0.02%
	W	上水道水	1.00	
混和剤	WR	AE減水剤	1.07	リグニンスルホン酸系
	SPA	高性能AE減水剤	1.10	ポリカルボン酸系

Table 3 材料密度, 計量誤差が単位水量測定結果に及ぼす影響

Influence of Material Density and Measurement Error on Water Content Measurement Result

誤差要因		変動量に対する水量算定誤差	
密度	水	$+0.01\text{g}/\text{m}^3$	$-2.4\text{kg}/\text{m}^3$
	セメント	$+0.01\text{g}/\text{m}^3$	$-0.4\text{kg}/\text{m}^3$
	細骨材	$+0.01\text{g}/\text{m}^3$	$-1.9\text{kg}/\text{m}^3$
	粗骨材	$+0.01\text{g}/\text{m}^3$	$-2.4\text{kg}/\text{m}^3$
計量値	水	+1%	$+1.5\text{kg}/\text{m}^3$
	セメント	+1%	$-0.4\text{kg}/\text{m}^3$
	細骨材	+3%	$-1.1\text{kg}/\text{m}^3$
	粗骨材	+3%	$-1.9\text{kg}/\text{m}^3$

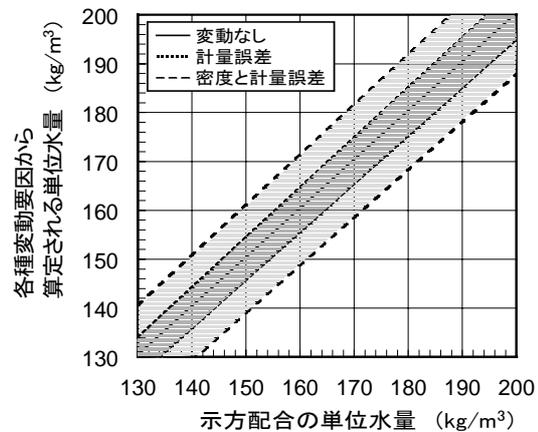


Fig. 3 製造時に想定される単位水量算定誤差
Water Content Error Presumed at Manufacture

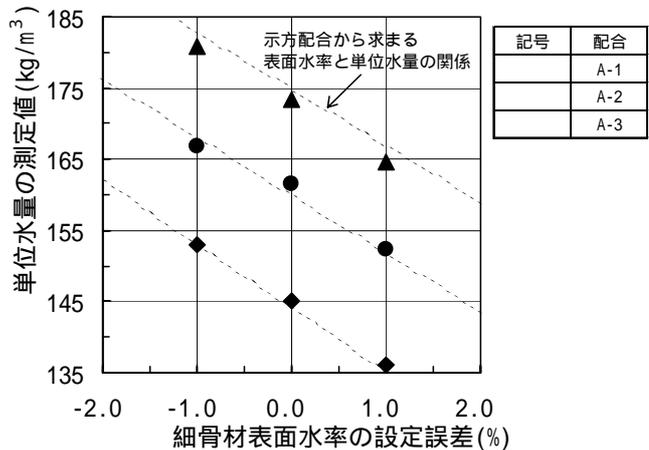


Fig. 4 細骨材表面水率の設定誤差による
単位水量の変動
Change in Water Content by the Establishment
Error of Surface Moisture

Table 5 コンクリートの示方配合
Specified Mixture of Concrete

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				WR (C×%)
			W	C	S	G	
A-1	55.0	45.0	175	318	798	994	0.25
A-2	55.0	45.0	160	291	826	1028	0.25
A-3	55.0	45.0	145	264	853	1063	0.25

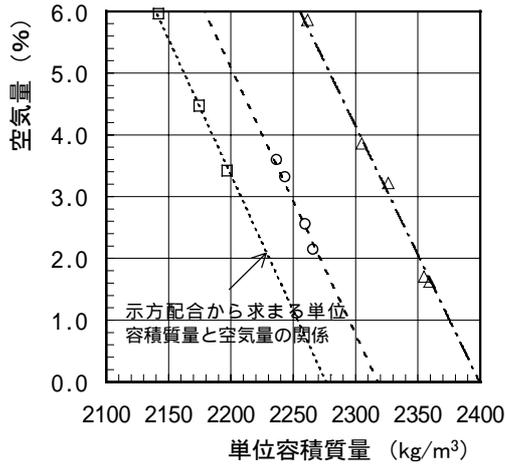


Fig. 5 モルタルの単位容積質量と空気量
Unit Mass of Mortar vs Air Content

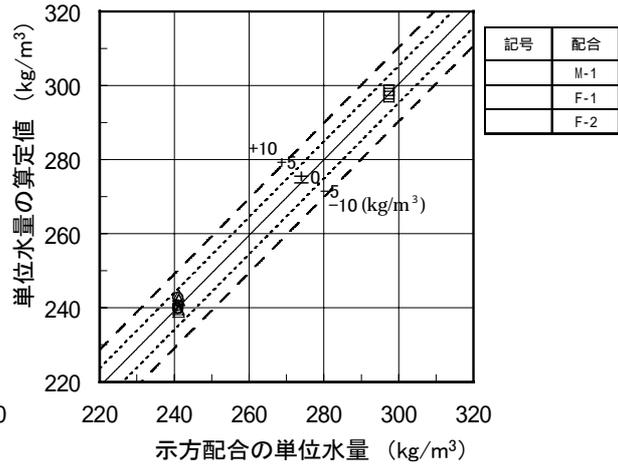


Fig. 6 単位水量の測定結果
Measurement Results of Water Content

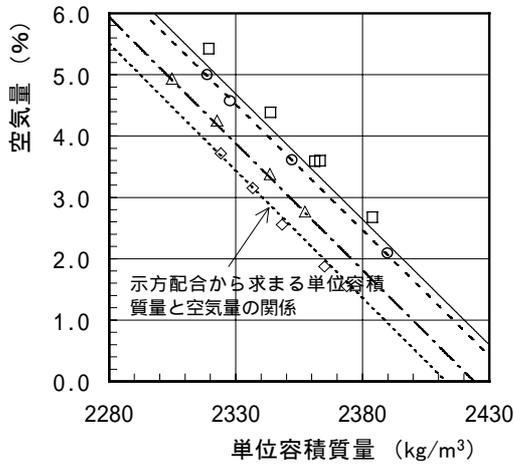


Fig. 7 コンクリートの単位容積質量と空気量
Unit Mass of Concrete vs Air Content

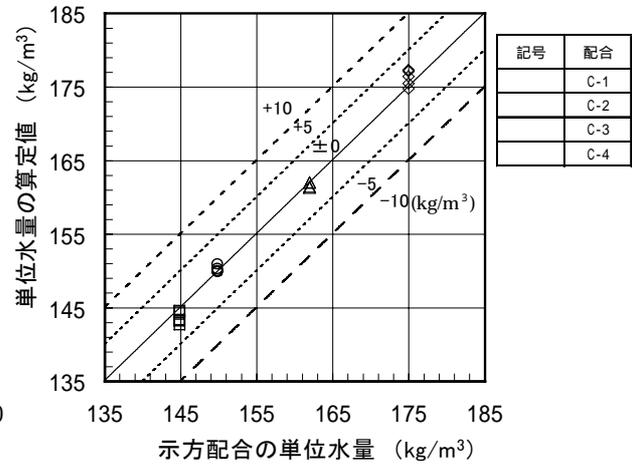


Fig. 8 単位水量の測定結果
Measurement Results of Water Content

4.2 装置誤差に起因する単位水量算定精度の検証

材料計量誤差, サンプルング誤差が生じない条件で, モルタルや各種配合のコンクリート以外に, 細骨材の代わりに内部吸水の影響を受けないガラスビーズを使用した擬似モルタルや, 骨材として粗骨材だけを使用した擬似コンクリートについても試験し, 測定精度を検証した。これらの配合を Table 6 に示す。

モルタル, 擬似モルタルおよび擬似コンクリートの単位容積質量と空気量の測定結果を Fig. 5 に, 単位水量の測定結果を Fig. 6 に示す。いずれの場合も, 単位容積質量と空気量の関係から求まる理論値とほぼ一致しており, 単位水量は設定値に対して $\pm 2.0 \text{ kg/m}^3$ の範囲で測定される結果が得られた。

各種コンクリート配合における単位容積質量と空気量の関係を Fig. 7 に, また, これらの関係から求めた単位水量の算定結果を Fig. 8 に示す。単位水量の水準を $145 \sim 175 \text{ kg/m}^3$ の範囲で変化させた場合, 測定値はいずれも単位容積質量と空気量の関係から求まる理論値とほぼ

Table 6 モルタルおよびコンクリートの示方配合
Specified Mixture of Mortar and Concrete

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					WR (C×%)
			W	C	S	G	Gb	
M-1	40.0		296	741	1129			
F-1	40.0		240	800		1348		
F-2	30.0		296	740			1173	
C-1	50.0	42.0	145	290	790	1108		0.25
C-2	50.0	45.0	150	300	837	1039		0.25
C-3	50.0	45.0	162	324	814	1010		0.25
C-4	45.0	48.0	175	389	826	909		0.25

一致する結果を示した。また, 単位水量の値は, いずれの配合の場合においても設定値に対して約 $\pm 2 \text{ kg/m}^3$ の範囲内で精度良く測定された。

はかりの最小秤量が 1 g , 空気量の計測精度が 0.1% の装置を用いた場合, 装置の性能から想定される単位水量の誤差が約 $\pm 2 \text{ kg/m}^3$ であることを考慮すると, これらの結果は試算結果と同様の高い精度で単位水量が求められていることを示している。

4.3 コンクリートの単位水量測定結果の一例

各種コンクリート配合を対象として、新たに開発した単位水量測定装置を用いて、フレッシュコンクリート中の単位水量を測定した。このうち、高流動コンクリート(Table 7参照)における測定結果の一例をFig. 9に示す。試験バッチが約 50 程度であるが、単位水量の測定結果は、平均値が 176kg/m³で示方配合上の計画値とほぼ一致し、ばらつきは±5kg/m³程度となっている。また、その他の配合の場合についても、概ね±4~5kg/m³の範囲内で単位水量が測定される結果が得られた。

これらの結果から、コンクリート製造時の計量誤差や試験時のサンプリング誤差を考慮したとしても、実用上は約±5kg/m³の精度でフレッシュコンクリート中の単位水量を測定できるものと考えられる。

5. まとめ

空気量と単位容積質量からフレッシュコンクリートの単位水量を算定する方法に関して、新たに開発した測定装置の概要を紹介するとともにその測定精度について検証した。本論文の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) エアメータ法による単位水量の測定方法によれば、測定装置の性能としてはかりの最小秤量が 1g、空気量の測定精度が 0.1%の装置を用いた場合、約±2kg/m³の精度で単位水量を測定することができる。
- 2) 今回開発したエアメータ法による単位水量測定装置を用いた場合、各材料の計量誤差や材料密度の変動さらには試験時のサンプリング誤差など各種誤差要因を考慮しても、実用上は約±5kg/m³程度の精度で単位水量を測定することができる。
- 3) エアメータ法による単位水量測定方法は、従来より行われているコンクリートの空気量試験に併せて測定することができ、現場荷卸し時の簡便かつ迅速な単位水量測定方法として有用である。

謝辞 本報で紹介したコンクリートの単位水量測定装置の製作にあたっては、(株)マルイの皆様にご協力を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 笠井芳夫,池田尚治:コンクリート試験方法(上),技術書院,1993.
- 2) 丸嶋紀夫ほか:水中質量法によるフレッシュコンクリートの単位水量試験方法,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.20-2, pp.313-318, 1998.
- 3) 中村博之,十河茂幸:フレッシュコンクリートの空気量と単位容積質量の測定結果による配合推定方法の適用,コンクリート工学年次論文集,Vol.23-2, pp.325-330, 2001.
- 4) 河野広隆,片平 博:フレッシュコンクリートの単位水量迅速測定法に関する実験的研究,土木研究所資料,

Table 7 コンクリートの示方配合
Specified Mixture of Concrete

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SPA (C+LF) × %
		W	C	S	G	LF	
33.0	47.0	175	530	726	836	50	0.95

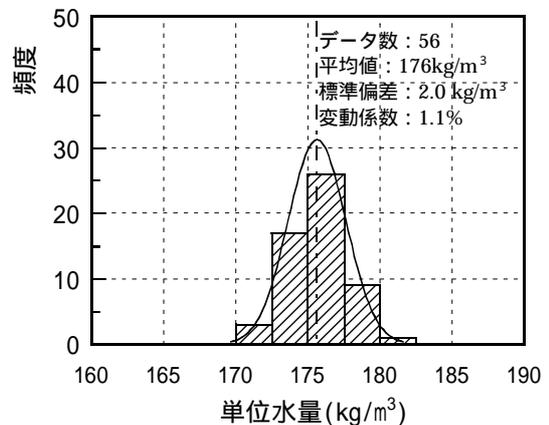


Fig. 9 単位水量測定結果の一例
An Example of Water Content Measurement Results

第 3657 号, 1999.

- 5) 河野広隆ほか:高温加熱によるフレッシュコンクリートの単位水量迅速推定方法の検討,土木研究所資料,第 3611 号,1999.
- 6) 友沢史紀ほか:高周波加熱装置を用いたフレッシュコンクリートの単位水量迅速試験方法の開発,日本建築学会構造系論文報告集, pp.1-7, 1989.
- 7) 中村博之ほか:減圧乾燥によるフレッシュコンクリートの単位水量検査方法に関する研究,セメントコンクリート論文集, No.54, pp.596-601, 2000.
- 8) 清水昭之,梅津裕二:フレッシュコンクリート中の水量推定のための簡易試験方法に関する研究(その3),日本建築学会学術講演概要集, pp.107-108, 1987.
- 9) 南條毅一ほか:単位水量試験方法(塩化物イオン法)の提案,第 10 回生コン技術大会集, pp.251-256, 1999.
- 10) 斎 充ほか:静電容量型水分計によるフレッシュコンクリートの単位水量推定,コンクリート年次論文報告集, Vol.20-2, pp.307-312, 1998.
- 11) 瀬古繁喜ほか:RI水分計を用いたポンプ配管中のコンクリートの水量連続モニタリング,コンクリート年次論文報告集, Vol.20-1, pp.125-130, 1998.
- 12) 若松岳ほか:現場におけるフレッシュコンクリートの単位水量管理方法に関する提案,コンクリート年次論文報告集, Vol.20-1, pp.107-112, 1998.
- 13) 片平 博:フレッシュコンクリートの単位水量,コンクリート工学, Vol.39-5, pp.64-67, 2001.