

コンクリートの単位水量管理方法に関する研究

－エアメータを使用した高精度推定方法の開発－

Research on Controlling Method of Water Content per Unit Volume of Concrete

- Development of Highly Accurate Estimation Method using Air Meter -

起橋孝徳* 上西 隆** 河野政典* 小竹琢雄***

要 旨

コンクリートの品質確保のために要求される単位水量の管理に当たり、これまでは高周波加熱乾燥法を用いた当社独自の方法を開発して精度の高い管理を行ってきた。しかし、高周波加熱乾燥法は測定に時間が掛かるなどの問題があった。そこで、試験方法が容易で所要時間も短いエアメータ法について、従来の方法では問題になっていた推定精度を改善するため、測定手順の追加と新たな推定式による単位水量推定方法を提案した。推定式は、試験時のサンプリング誤差を補正でき、製造時の計量誤差によって計画調合とは異なったコンクリートでも単位水量を推定できることを特徴としている。また、この方法によって従来のエアメータ法よりも高い精度で単位水量を推定できることを、室内実験や現場実験を行って確認した。

キーワード：コンクリート、品質管理、単位水量、エアメータ法、粗骨材量

1. まえがき

近年、コンクリートの品質に対する関心が高まり、要求性能を確保するための管理が求められている。なかでも、コンクリート製造時の単位水量の変動については強度や耐久性などの品質に大きな影響を及ぼすため、特に管理が重視されている。なお、国土交通省大臣官房官庁営繕部からは、「レディーミクストコンクリートの品質確保について」、「同運用について」の通知が出され、延べ床面積 1500m² 程度以上の新築工事においては、単位水量の測定を行うことが定められている。

フレッシュコンクリート中の単位水量の測定には複数の方法があり、現在は高周波加熱乾燥法、エアメータ法¹⁾²⁾、静電容量法、RI 法などが用いられている。これらの方法は、いずれもフレッシュコンクリート中の単位水量を直接測定するものではないため、得られた単位水量の値には、算出方法に基づく仮定条件に由来する誤差が含まれている。電子レンジを用いた「高周波加熱乾燥法」については、既に当社独自の推定式を構築し、精度の高い推定結果に基づいた管理を行ってきた⁴⁾。しかし、高周波加熱乾燥法は、測定に時間が掛かり、頻繁に測定しなければならない場合には、受入れ試験の実施によってコンクリートの施工に時間的な制約が生じる問題があった。これに対して、エアメータ法は測定方法が簡便であり、短時間で単位水量を推定できるので、測定頻度の高い場合にも対応できる利点を持つが、高周波加熱乾

燥法よりも精度が低いことが問題であった。そこで、エアメータを用いて従来よりも高精度に単位水量を推定できる方法を開発した。また、室内試験や現場実験を行って、この推定方法の適用性と推定精度を検証した。

2. 単位水量推定方法

2.1 測定方法

測定は基本的に従来のエアメータ法に準拠するが、試験を行う際に採取する試料はサンプリング誤差によって製品の調合とは異なっている。この誤差を補正するために、測定に用いた試料から粗骨材を洗い出して計量し、この値から試料中に含まれる単位粗骨材量を算出して補正する手順を従来の測定方法に加えた。測定手順を、写真-1に示す。(以下、提案する測定方法を「エアメータ洗出法」と称する)

a. 使用器具

- ・圧力式エアメータ
- ・秤 (最大秤量 25kg 以上、最小目盛 1g 以下)
- ・籠形ふるい (公称目開き 4.75mm、線径 1.6mm)
- ・洗い容器
- ・タオルウェス

b. 測定手順

- i. 空気量測定法に従ってコンクリートの空気量を 0.1%単位で測定する
- ii. 試料の質量を測定する

*技術研究所 **建設本部建築部 ***東日本支社建築工務部

- iii. エアメータ内のコンクリート試料をふるい上で水洗いし、取り出した粗骨材の質量を表面水を除いて測定する
- iv. 骨材試験成績表に基づいて、粒径 5mm 未満の粗骨材量の補正を行う
- v. 推定式により単位水量を計算する

2.2 提案式

従来のエアメータ法では、試料の調査は細骨材の表面水率以外は調査計画通りである前提で水量推定を行っている。しかし、実際の調査は計量誤差により計画調査と異なる調査となっている。そこで、この誤差を補正するために、計画調査と製品、および試料中の各材料の単位量の関係について以下の仮定を行い、その関係を元に測定結果から単位水量を推定する式をあらたに構築した。(以下、構築した推定式を「提案式」と称する) 提案式による単位水量推定の仮定条件を、図-1 に示す。

a. 仮定条件

単位水量の推定式を構築するに当たって、以下の条件を仮定した。

- i. 製品のセメントと粗骨材の材料割合(質量比)は、計量値の比と等しい
(これは、コンクリート製造の計量過程でセメントの計量値の信頼性が最も高いことと、粗骨材は細骨材に比べて表面水率の変動幅が小さく、管理も容易であることによる。)
- ii. 製品の空気量は、測定値と等しい
- iii. 製品の単位セメント量は、計量値に対して、調査計画時の空気量と製品の空気量の差によって生じる全容積の製造誤差を補正した値に等しい
- iv. 製品コンクリート中のモルタルの材料割合(水:セメント:細骨材の容積比)は、測定に用いるためにサンプリングした試料と等しい

- v. 製品コンクリート中の、水、セメント、細骨材の各単位量は、測定に用いた試料中の単位量に対して、サンプリングによって生じた粗骨材量の誤差を補正した値に等しい

b. 推定式の構築

単位水量の推定式を以下に構築した。提案式は従来の推定式と異なり、単位水量の推定に調査計画上の単位水量や細骨材量を用いない。このため、製造時の計量誤差によって計画調査とは異なったコンクリートでも、セメントと粗骨材の計量値に基づいて、単位水量を精度良く推定できる。

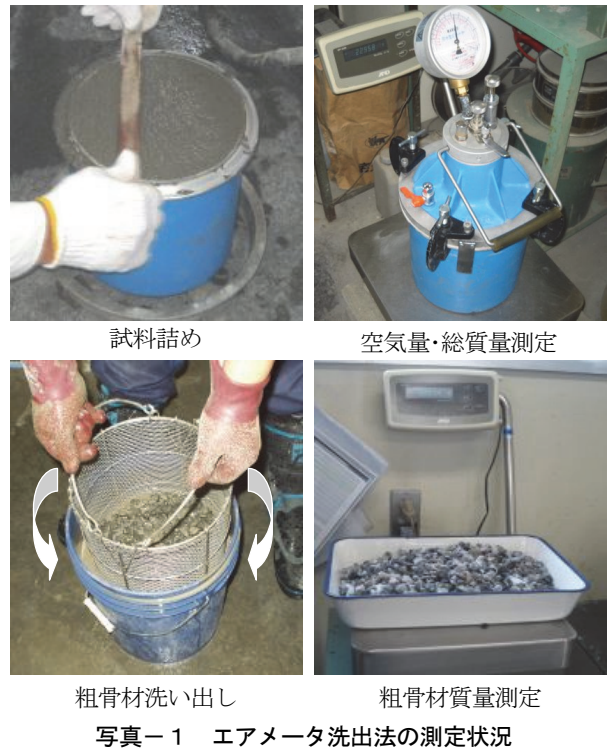


写真-1 エアメータ洗出法の測定状況

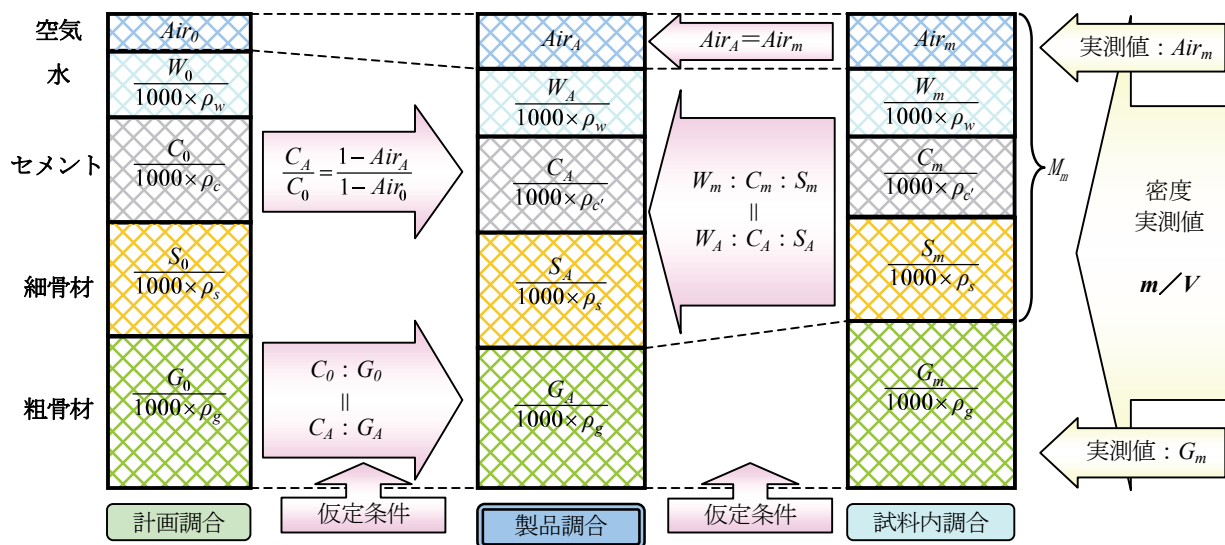


図-1 提案式による単位水量推定の仮定条件

仮定 i より、製品の単位粗骨材量は、計量単位粗骨材量に対して製品単位セメント量と計量単位セメント量の比を乗じたものとして、式(1)に表す。

$$G_A = G_0 \times \frac{C_A}{C_0} \quad (1)$$

仮定 ii、iii より、製品の単位セメント量は計量単位セメント量に対して、計画空気量と測定空気量の差を補正したものとして、式(2)に表す。

$$C_A = C_0 \times \frac{1 - Air_m}{1 - Air_0} \quad (2)$$

仮定 iv、v より、試料中の単位セメント量は製品の単位セメント量に対して、試料中の単位粗骨材量のサンプリング誤差を補正したものとして、式(3)に表す。

$$C_m = C_A \times \frac{M_m}{1 - \frac{G_A}{1000 \times \rho_g}} \quad (3)$$

$$\text{ただし、} M_m = 1 - \frac{G_m}{1000 \times \rho_g} \quad (4)$$

$$G_m = \frac{m_g}{V} \quad (5)$$

式(3)に式(1)、(2)を代入して、式(6)を得る。

$$C_m = C_0 \times \frac{M_m}{\frac{1 - Air_0}{1 - Air_m} - \frac{G_0}{1000 \times \rho_g}} \quad (6)$$

試料の内、モルタル中の各材料の単位量と体積の関係より、式(7)を得る。

$$\frac{W_m + \frac{C_m + S_m}{\frac{\rho_c}{1000} + \rho_s}}{1000} + Air_m = M_m \quad (7)$$

試料中の各材料の単位量と試料密度の関係より、式(8)を得る。

$$S_m = \frac{m}{V} - G_m - W_m - C_m \quad (8)$$

式(7)に式(8)を代入して、式(9)を得る。

$$W_m = \frac{1000 \times (M_m - Air_m) \times \rho_s + C_m \times \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_c}\right) - \frac{m}{V} + G_m}{\rho_s - 1} \quad (9)$$

仮定 v より、製品の単位水量は、試料中の単位水量に粗骨材のサンプリング誤差を補正したものとして、式(10)に表す。

$$W_A = W_m \times \frac{1 - \frac{G_A}{1000 \times \rho_g}}{M_m} \quad (10)$$

式(10)に式(1)、(2)を代入して、式(11)を得る。

$$W_A = W_m \times \frac{1 - \frac{G_0}{1000 \times \rho_g} \times \frac{1 - Air_m}{1 - Air_0}}{M_m} \quad (11)$$

ここに、

- W_A : 製品単位水量(kg/m³)
- C_A : 製品単位セメント量(kg/m³)
- G_A : 製品単位粗骨材量(kg/m³)
- Air_A : 製品空気量= Air_m とする
- C_0 : 計量(もしくは計画)単位セメント量(kg/m³)
- G_0 : 計量(もしくは計画)単位粗骨材量(kg/m³)
- Air_0 : 計画空気量
- W_m : 測定試料単位水量(kg/m³)
- C_m : 測定試料単位セメント量(kg/m³)
- S_m : 測定試料単位細骨材量(kg/m³)
- G_m : 測定試料単位粗骨材量(kg/m³)
- M_m : 測定試料単位モルタル体積(m³/m³)
- Air_m : 測定空気量
- ρ_w : 水密度(g/cm³)=1.0 とする
- ρ_c : 水を用いた試験によるセメント密度(g/cm³)
- ρ_s : 細骨材密度(g/cm³)
- ρ_g : 粗骨材密度(g/cm³)
- V : エアメータ容積(m³)
- m : エアメータ内試料質量(kg)
- m_g : エアメータ内粗骨材質量(kg)

以上、製品の単位水量 W_A は、式(6)、(9)、(11)に測定値を代入することによって得られる。なお、セメントや細骨材、粗骨材の単位量についても、上記の式から推定することが可能である。

3. 単位水量推定精度確認実験

3.1 室内実験

試験室内で、練り混ぜ水量を正確に管理して製造されたコンクリートを用いて、従来のエアメータ法とエアメータ洗出法、および高周波加熱乾燥法⁴⁾(以下、「レンジ法」と称する)について精度の比較試験を行った。

a. 実験方法

検討に使用した調査を表-1に、使用材料を表-2

に示す。試験対象とするコンクリートの強度は 60～130N/mm² の範囲とし、強度領域に応じて 2 種類のセメントを使用した。また、一部の調査では意図的に加水を行って、コンクリートの単位水量が計画調査よりも多くなった場合について検討した。コンクリートの練り混ぜには水平二軸強制練りミキサー（容量 0.055m³）を使用し、各調査ごとに 0.025m³ 製造した。

エアメータ法の試験は、2.1 に記した測定方法に従って行い、ここで得られた同一の値を従来式、および提案式に代入して単位水量をそれぞれ算出した。なお、提案式におけるセメントの密度は、セメントの吸水による影響を考慮し、JIS R 5201 の密度試験を参考に、鉱油の代わりに水を用いた試験によって得られた値を用いた。

レンジ法の試験は、市販の電動ふるい装置を用いてフレッシュコンクリートを 1 分間ウェットスクリーニングして得られたモルタル約 400g を試料として用い、ステンレス製の丸皿を容器として電子レンジ（200V、1600W）で 8 分間の加熱乾燥を行って、加熱前後の質量から単位水量を算出した。

b. 実験結果

エアメータ洗出法では、従来のエアメータ法に比べて試料中の粗骨材の洗い出しと計量の作業が増えるが、これらに掛かる時間は籠形ふるいの使用などによって短縮でき、ウェットスクリーニングや加熱乾燥を要するレンジ法に比べて短時間で試験を終了できた。

エアメータ中のコンクリート試料に含まれる粗骨材

表-1 室内実験調査

セメント種類	呼び強度 (N/mm ²)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					空気量 (%)
			W	C		S	G	
				SFC	MC			
MC	60	34.7	170	-	490	861	864	2.0
		37.7	182	-	484	850	853	2.0
	70	30.2	170	-	563	803	864	2.0
		26.7	170	-	637	760	848	2.0
SFC + MC	90	29.0	182	-	629	751	837	2.0
		23.0	170	148	592	671	848	2.0
	100	20.8	165	318	476	634	848	2.0
		19.5	155	476	318	634	873	2.0
SFC	110	18.0	165	550	367	526	848	2.0
		80	28.8	168	582	-	793	850
	100	19.5	155	794	-	630	861	2.0
		110	18.4	168	911	-	526	838
130	16.6	168	1007	-	446	837	2.0	

表-2 使用材料

種別	記号	銘柄・産地等	物性値
セメント	SFC	シカフェームプレミックス 低熱ポルトランドセメント	密度:3.08,水中密度:3.09, 比表面積:6350cm ² /g
	MC	中庸熱 ポルトランドセメント	密度:3.21,水中密度:3.29, 比表面積:3760cm ² /g
細骨材	S	富津産山砂	密度:2.60,吸水率:1.27%, F.M.2.46
粗骨材	G	桜川産硬質 砂岩碎石	密度:2.65,吸水率:0.62%, 実積率:61.5%

のサンプリングによる誤差を、図-2 に示す。試料中の粗骨材量は、計画値の 96～118% にあり、特に意図的に加水を行った調査で多くなった。これは、試料を採取する際に、加水によって分離傾向にあるコンクリートでは採取した試料が不均質になり易くなるためと考えられる。

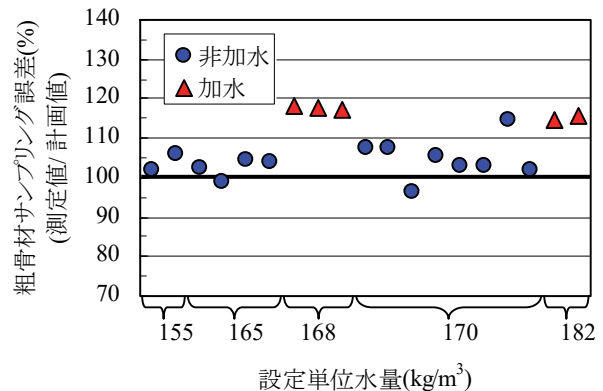


図-2 室内粗骨材サンプリング誤差

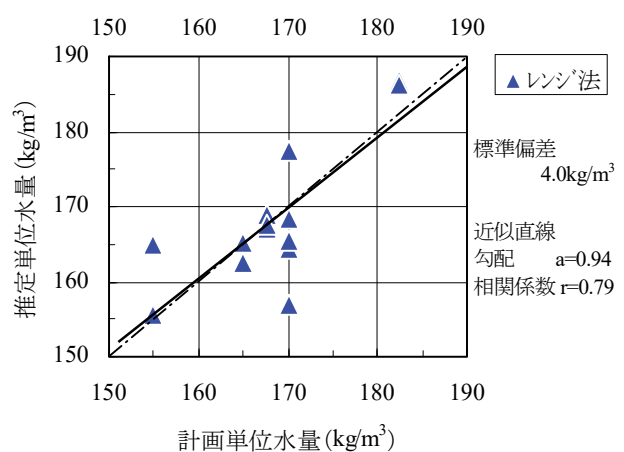
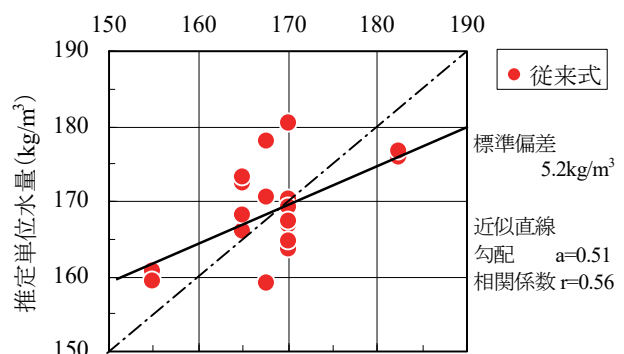
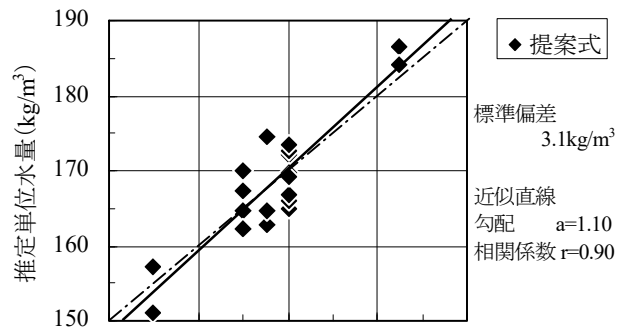


図-3 室内単位水量試験結果

単位水量の推定結果と単位水量との関係を、**図-3**に示す。従来式による推定結果では、計画単位水量と推定単位水量の相関係数は 0.56 と小さく、単位水量の計画値の変化に対する推定値の追従性が低いと考えられる。また、標準偏差も 5.2kg/m^3 であり、誤差の大きい結果であった。一方、レンジ法における相関係数は 0.79 で、計画単位水量の変化に対して推定単位水量の値は良好に対応し、標準偏差も 4.0kg/m^3 と従来式によるエアメータ法よりも小さな値を示した。これに対して、提案式は試料中の粗骨材量以外の測定値は従来式と同じ値を用いているが、相関係数は 0.90 と高く、計画単位水量の変化にはレンジ法と同等以上の良好な対応を示していた。また、標準偏差も 3.1kg/m^3 と今回試験した中では最も小さな値を示した。このことから、エアメータ洗出法を用いることによって、従来よりも高い精度の試験結果を得られることが確認できた。

3.2 現場実験

エアメータ洗出法によるコンクリート品質管理の適用性を確認するため、実際の工事に出荷されたコンクリートを用いて単位水量試験を行った。

a. 実験方法

検討に使用した調査を**表-3**に示す。試験に当たっては、任意の生コン車からコンクリートを採取して各種単位水量試験を行った。なお、一部の調査に対しては、採取したままのコンクリートと、採取したコンクリート

表-3 現場実験調査

呼び強度 (N/mm ²)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					空気量 (%)
		W	C		S	G	
			SFC	MC			
100	19.7	165	335	503	605	824	2.0
	+12.6kg/m ³ 加水						
	26.7	170	-	637	773	853	2.0
80	+8.3kg/m ³ 加水						
	+16.6kg/m ³ 加水						
	39.4	170	-	431	865	904	3.0
48	+8.3kg/m ³ 加水						
	+16.6kg/m ³ 加水						

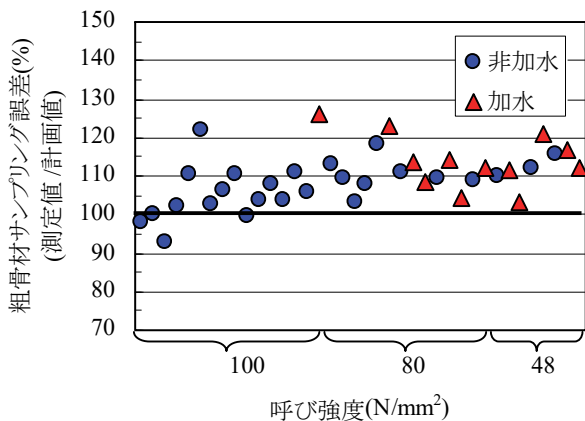


図-4 現場粗骨材サンプリング誤差

に $8\sim 17\text{kg/m}^3$ 程度の加水を行って攪拌した試料を用いて、水量の変動に対する推定精度を確認するとともに、圧縮強度試験用供試体を採取し、圧縮強度と単位水量試験結果に基づく推定結合材水比を対比した。

b. 実験結果

エアメータ中のコンクリート試料に含まれる粗骨材のサンプリングによる誤差を、**図-4**に示す。試料中の粗骨材量は、計画値の 93~123%であったが、加水の有無に関わらず粗骨材量は変動していた。この値の中には製造時の計量誤差も含まれているが、実工事における単位水量試験では室内試験の場合とは異なり、アジテータ車から一輪車、試験用練り舟など、エアメータに詰めるまでのサンプリングの経路が長いことが、誤差が大きくなった主な要因と考えられる。

単位水量の計画値と推定値の関係を、**図-5**に示す。従来式による単位水量の推定値は、計画値よりも平均で 8.3kg/m^3 小さくなり、誤差範囲は $+3.4\sim -27.7\text{kg/m}^3$ に広

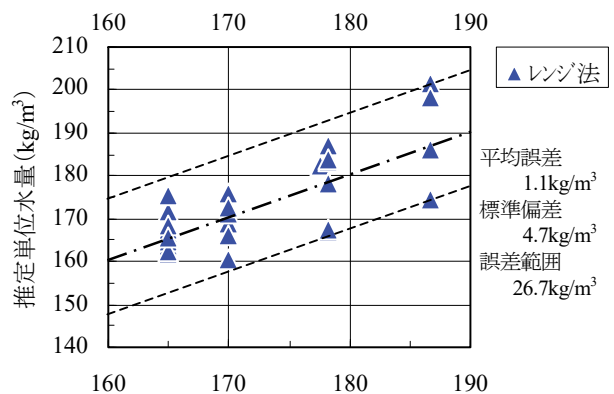
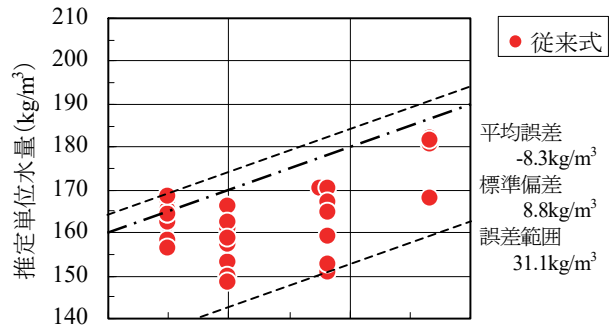
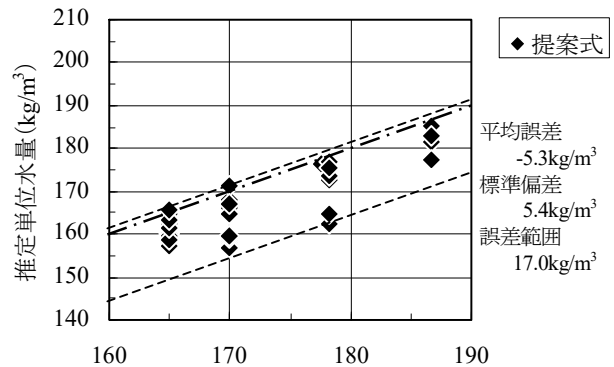


図-5 現場単位水量試験結果

がっていた。一方、レンジ法による推定値は、平均では計画値に対して 1.1kg/m^3 大きいのみであったが、誤差の範囲は $+14.8\sim-11.9\text{kg/m}^3$ であった。これに対して、提案式による推定値は、計画値よりも平均で 5.3kg/m^3 小さくなっているが、誤差範囲は $+1.1\sim-15.9\text{kg/m}^3$ に収まっており、設定値の変化量に対して良く応答し、ばらつき小さい結果が得られた。

工場から出荷されたコンクリートは、試料の単位水量に製造誤差を含む。そこで、この製造誤差による影響を除いて試験方法の精度を評価するため、加水を行った場合の各試験結果について、加水前後の単位水量推定値の差を実際の加水量と比較した。加水量の設定値と推定値の関係を、図-6に示す。加水量に対する推定精度は、提案式が最も良好であった。ここで、レンジ法の推定誤差が比較的大きくなっているが、これは今回測定に用いた試料の絶対量が少ないため、測定誤差が大きく表れたものと考えられる。

用いたセメント種類が同じ中庸熱ポルトランドセメントで、呼び強度が 80N/mm^2 と 48N/mm^2 の調合における、単位水量試験の結果から得られた推定結合材水比と材齢4週圧縮強度との関係を、図-7に示す。また、工場で保有する結合材水比と材齢4週圧縮強度の関係式を用いて推定結合材水比から求めた強度と、供試体強度の差を表-4に示す。推定強度と供試体強度との差は平均と標準偏差のいずれも、今回比較した試験方法の中では提案式による結果が最も小さくなった。このことから、エアメータ洗出法と提案式によってコンクリート強度を精度良く推定できると考えられる。

4. まとめ

コンクリートの単位水量試験方法であるエアメータ法について、測定が簡易で所要時間の短い利点を生かしつつ、推定精度を高めることを目的として、従来の方法に試料中の粗骨材を計量する手間を加えるとともに、新たに構築した推定式を用いる方法を提案した。また、室内実験と現場実験によって推定精度を検証し、この方法による単位水量の推定結果は、従来のエアメータ法よりも精度が高く、高周波加熱乾燥法と同程度の精度で推定できることを確認した。

5. あとがき

今回開発した単位水量推定法は、従来の方法に簡単な手間を加えることで推定精度を高めることができる手法である。ここで提案した推定式は、従来の推定式と異なり、試験時のサンプリング誤差を補正でき、製造時の計量誤差により計画調合とは異なったコンクリートでも、セメントと粗骨材の計量値に基づいて単位水量を精度良

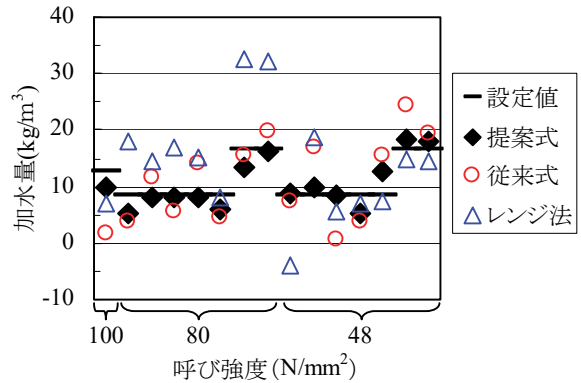


図-6 加水量に対する単位水量試験結果

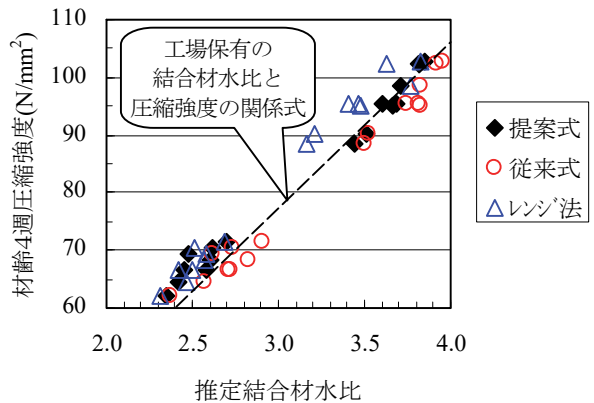


図-7 単位水量試験結果と圧縮強度の関係

表-4 単位水量試験による強度推定誤差

	推定強度と供試体強度の差		
	平均	範囲	標準偏差
提案式	-1.6 N/mm ²	8.7 N/mm ²	3.1 N/mm ²
従来式	2.2 N/mm ²	9.3 N/mm ²	3.4 N/mm ²
レンジ法	-4.3 N/mm ²	8.2 N/mm ²	5.0 N/mm ²

く推定できることを特徴としている。今後は、この結果を展開し、エアメータ洗出法による単位水量管理の普及に取り組む予定である。

【参考文献】

- 1) 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、第3657号、1999
- 2) 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、No.2、pp.325-330、2001
- 3) 高橋敏樹、近松竜一、十河茂幸、「単位容積質量を用いた単位水量の迅速評価に関する研究」、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.1091-1096、2003
- 4) 河野政典、上西 隆、起橋孝徳、「フレッシュコンクリートの単位水量測定方法に関する研究」、奥村組技術研究年報、Vol.28、pp.31-36、2002