

論文 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

丸嶋紀夫*1・黒羽健嗣*2・並木哲*3・久保田浩*4

要旨：フレッシュコンクリートの性状や硬化コンクリートの物性には、水セメント比や単位水量が大きな影響を及ぼす。従って、レディーミクストコンクリートの現場受入れ時の品質検査として単位水量試験は重要である。ここではフレッシュコンクリートの空中と水中での質量差を測定して単位水量を求める方法を取り上げ、試験方法の精度と誤差を検討した。その結果、材料の密度と粒度を把握していれば、本方法は十分な精度を有することがわかった。また、レディーミクストコンクリートの品質検査として単位水量試験を実施した結果、コンクリートの調合管理、流動性管理、強度管理に有効であることがわかった。

キーワード：フレッシュコンクリート、試験方法、単位水量、品質管理、水中質量、誤差

1. はじめに

フレッシュコンクリートの性状や硬化コンクリートの物性には、水セメント比や単位水量が大きな影響を及ぼす。このため建設現場にてコンクリート荷卸時の品質検査として単位水量試験の要求が高まっている。単位水量試験は今まで種々の試験法^{1) 2)}が検討されているが、現状では十分活用されていない。

本研究は、従来の方法より簡単で精度の高い試験法として、フレッシュコンクリートの空中での質量と水中での見掛けの質量（以下、水中質量と記す）から単位水量を推定する方法（以下、水中質量法と称す）を提案するものである。ここでは本試験法の誤差の検討と、レディーミクストコンクリート（以下、生コンと記す）工場で製造したコンクリートの単位水量測定を行ない、本試験法の有効性を検討した。

2. 試験方法の概要

2.1 試験手順

本試験法の手順は、図-1に示すように、①コ

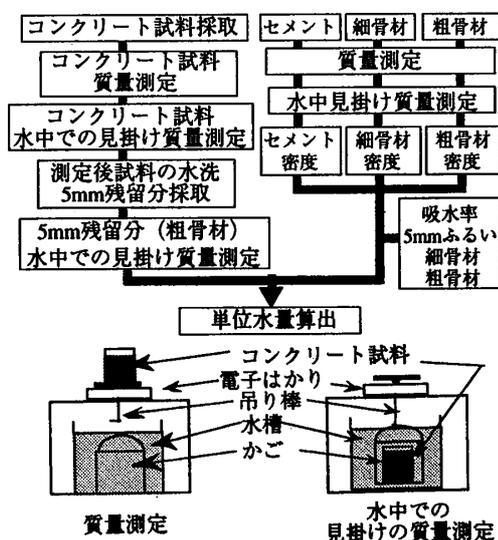


図-1 試験方法のフロー

ンクリート試料を採取して質量を測定、②試料中の空気を追い出し水中質量を測定、③測定後の試料を5mmふるい上で水洗して粗骨材を採取し水中質量を測定、である。別に、コンクリート試料の場合と同じ水中質量法によりセメント、細骨材、粗骨材の密度を求める。また、JIS規格の骨材の吸水率とふるい分けの測定を行ない、これらの結果を用い計算により単位水量を求める。

*1大成建設(株)技術研究所 建築材料研究室 主席研究員(正会員)

*2大成建設(株)技術研究所 建築材料研究室 室長 工博(正会員)

*3大成建設(株)技術研究所 建築材料研究室 主任研究員(正会員)

*4大成建設(株)技術研究所 仕上材料研究室 研究員

2.2 単位水量の算定

単位水量の計算式を式(1)～(5)に示す。

$$\text{Con}_w = \text{Con}_s - \rho_w (V_c + V_s + V_g + V_w) \quad (1)$$

$$V_c + V_s + V_g + V_w = \frac{C_s}{\rho_c} + \frac{S_s}{\rho_s} + \frac{G_s}{\rho_g} + \frac{W_s}{\rho_w} \quad (2)$$

$$S_s = \text{Con}_s - C_s - G_s - W_s \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Con}_w = \text{Con}_s \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) + C_s \left(\frac{\rho_w}{\rho_s} - \frac{\rho_w}{\rho_c}\right) \\ + G_s \left(\frac{\rho_w}{\rho_s} - \frac{\rho_w}{\rho_g}\right) - W_s \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$G_s = \frac{\rho_g}{\rho_g - \rho_w} G_w \quad (5)$$

ここで、 Con_s 、 Con_w はコンクリート試料の質量と水中質量測定値 (g)、 V_c 、 V_s 、 V_g 、 V_w はセメント、細骨材、粗骨材、水の体積(cm^3)、 C_s 、 S_s 、 G_s 、 W_s はセメント、細骨材、粗骨材、水の質量 (g)、 ρ_c 、 ρ_s 、 ρ_g 、 ρ_w はセメント、細骨材、粗骨材、水の密度 (g/cm^3)、 G_w は試料中の粗骨材の水中質量測定値 (g)である。

セメント、細骨材、粗骨材の密度は水中質量法により測定して、式(6)により求める。

$$\text{材料の密度} = \frac{\text{乾燥状態での質量}}{\text{乾燥状態での質量} - \text{水中質量}} \times \rho_w \quad (6)$$

コンクリート試料の水中質量は各構成材料の体積分だけ質量より軽くなるので、式(1)のように表すことができる。次に、各構成材料の体積は式(2)のように、

細骨材量 S_s は式(3)

のように表されるので、式(2)と式(3)を式(1)に代入して式(4)が得られる。

セメント量 C_s は計画調合通りとして水量の変化は細骨材の表面水の変動によって生じると仮定すると、コンクリート試料の質量と水中質量の測定値 Con_s 、 Con_w と各構成材料の密度測定値から、式(4)により試料の水量 W_s が求められる。ここで、試料の5mm残留分は粗骨材と細骨材の両方が混入しているので、5mm残留分の水中質量と細粗骨材のそれぞれの5mmふるい分け試験の値を用いて、計算により粗骨材の水中質量 G_w を求める。更に、求めた W_s に試料中の骨材の吸水率分の水を補正して、単位水量が算出される。

3. 試験精度と誤差の検討

3.1 室内試験による精度の検証

本試験方法の精度を室内実験により検討した。普通強度から高強度クラスまでの水セメント比の異なる調合のコンクリート4種類を各々30lを練り混ぜ、単位水量の測定を行なった。使用材料を表-1に、計画調合を表-2に示す。使用骨材の表面水率を105℃加熱乾燥により測定して実施調合の単位水量を正確に求め、本試験法により測定した単位水量推定値(1調合当り3回測定)と比較した。その結果を表-3に示す。試験全体としての測定値の標準偏差は $\sigma=1.2\text{kg}/\text{m}^3$ であり、信頼限界95%(1.96σ)でも $\pm 2.4\text{kg}/\text{m}^3$ の推定誤差となり、本試験法は十分な精度がある

表-1 使用材料

材料名	種類および品質
セメント	普通ポルトランドセメント (N社製), 比重3.16, 密度3.225(g/cm^3)
細骨材	木更津産山砂, 表乾比重2.60, 吸水率1.89%, 粗粒率2.59, 密度2.711(g/cm^3)
粗骨材	青梅産砕砂, 表乾比重2.65, 吸水率0.74%, 粗粒率6.67, 密度2.676(g/cm^3)
混和剤	リグニン系AE減水剤 (N社製), ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 (N社製)

註) 密度は水中質量法により測定

表-2 コンクリートの計画調合

調合記号	W/C (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
F21	63	49.4	4.5	175	278	889	929
F36	42	47.2	3.0	175	417	814	929
F48	33	44.2	3.0	175	530	720	929
F60	28	42.3	2.0	175	625	668	929

表-3 単位水量試験結果

調合記号	実施調合の単位水量 (kg/m^3)	単位水量測定値 (kg/m^3)		誤差計算	
		平均値	最大-最小差	実施-平均差	誤差%
F21	174.7	174.9	2.4	-0.2	0.1
F36	174.8	173.8	2.5	+1.0	0.6
F48	175.1	174.1	1.4	+1.0	0.6
F60	175.3	173.8	0.8	+1.5	0.9

ことがわかった。

3.2 計算による誤差の検討

想定される誤差要因としては、①材料品質試験の測定誤差、②現場での単位水量試験の測定誤差、③コンクリート製造時の材料の計量誤差、が考えられる。それぞれの誤差要因で予想される誤差範囲を表-4に示す。本試験法の固有の誤差を検討するために、まず表-1、-2のコンクリート材料と調合にて、これらの誤差条件を入れて2.2の計算手順により単位水量を求めて推定誤差を算出した。結果を表-5に示す。次に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、各調合による推定誤差の合成を行った²⁾。個々の変動要因による単位水量の推定誤差を 3σ として、式(7)により累積誤差を求めた。結果を表-6に示す。1.96 σ は95%信頼限界、 3σ は99.7%信頼限界を示す。ここで総合誤差は各誤差

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad (7)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_n$: 個々の変動要因の推定誤差の1/3

の累積合成を行ったもので、本試験法の固有の単位水量の総合誤差は95%信頼限界で $\pm 4 \sim 6 \text{ kg/m}^3$ となった。3.1の室内試験の単位水量の誤差の結果は充分この範囲内であることがわかる。

次に、本試験を生コンへ適用する方法から予想される誤差を検討した。ケースとしては、①単位水量を正確に求めて調合管理に利用する場合、②現場受入れ時の品質管理試験に利用する場合、の2つとした。

(1) 調合管理に利用する場合

この場合には、単位水量を正確に求めるために、試料と同じバッチの骨材を採取し、その品質試験を実施する。品質試験に時間がかかるため単位水量推定値は数日後に結果が判明するが、試験誤差は本試験法の固有の誤差のみであり、前述のように $\pm 4 \sim 6 \text{ kg/m}^3$ と小さい。

(2) 受入れ時の品質管理試験に利用する場合

この場合、事前に求めた骨材の品質試験値を用いることにより、試料採取から15分程度で単位水量を求めることができる。しかし、(1)で求

表-4 誤差要因と誤差条件の設定

材料試験の測定誤差						単位水量試験の測定誤差						材料の計量誤差 (%) (JIS A 5308 レディーミック ストコンクリートによる)				
材料の密度 (g/cm ³)		骨材の吸水率 (%)		骨材の粒度 (%)		空気 残留率 (%)	温度 (°C)	秤 (g)	骨材の 表面水率(%)				水	セメント	細骨材	粗骨材
セメント	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材			細骨材	粗骨材	水	セメント	細骨材	粗骨材		
± 0.02	± 0.02	± 0.02	± 0.20	± 0.15	± 2.0	± 3.5	+5	± 1	± 0.2	± 1.0	± 0.5	± 1	± 1	± 3	± 3	

表-5 誤差条件から求めたそれぞれの誤差要因と単位水量推定値の誤差

調査 記号	単位水量誤差 (kg/m ³)																
	材料試験の測定誤差						単位水量試験の測定誤差						材料の計量誤差				
	材料の密度		骨材の吸水率		骨材の粒度		残留 空気	温度	秤	骨材の表面水				水	セメント	細骨材	粗骨材
	セメント	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材				粗骨材	細骨材	粗骨材					
Fc21	0.86	3.79	3.67	1.74	1.23	2.00	3.55	3.44	0.24	0.61	0	0.51	0.19	0.61	2.79	0	
Fc36	1.28	3.47	3.74	1.59	1.26	1.57	3.04	2.33	0.25	0.62	0	0.43	0.16	0.85	2.18	0	
Fc48	1.63	3.07	3.78	1.41	1.27	1.24	2.71	2.33	0.25	0.63	0	0.39	0.14	1.03	1.71	0	
Fc60	1.92	2.85	3.82	1.31	1.28	1.02	2.41	1.57	0.26	0.64	0	0.34	0.13	1.15	1.40	0	

表-6 誤差が累積した場合の単位水量誤差 (kg/m³)

調査 記号	材料試験の測定誤差			単位水量試験の測定誤差			材料の計量誤差			総合誤差		
	σ	1.96 σ	3 σ	σ	1.96 σ	3 σ	σ	1.96 σ	3 σ	σ	1.96 σ	3 σ
Fc21	2.35	4.61	7.05	1.18	2.31	3.54	0.96	1.87	2.87	2.80	5.49	8.40
Fc36	2.20	4.31	6.60	0.82	1.61	2.46	0.78	1.53	2.34	2.47	4.85	7.42
Fc48	2.08	4.07	6.24	0.82	1.61	2.46	0.67	1.31	2.00	2.33	4.57	7.00
Fc60	2.02	3.95	6.05	0.58	1.14	1.75	0.61	1.19	1.82	2.18	4.28	6.55

めた本試験法の固有の誤差のほかに、生コン工場の材料品質の変動による誤差が加わることになる。表-7に設定した誤差条件を示す。誤差の計算は、まず前述の誤差計算の方法で表-7の誤差要因ごとに単位水量推定値の誤差を求め、次に式(7)

表-7 誤差要因と誤差条件の設定

材料品質変動						
材料の絶乾密度 (g/cm ³)		骨材の吸水率 (%)		骨材の粒度 (%)		
セメント	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材
±0.02	±0.05	±0.05	±0.6	±0.3	±5	±10

表-8 誤差が累積した場合の単位水量誤差 (kg/m³)

調査記号	(A) 材料の品質変動による誤差 (表-7の誤差の累積結果)			(B) 本試験法固有の総合誤差 (表-6の総合誤差と同じ)			品質管理試験としての全体誤差 (A)+(B)		
	σ	1.96 σ	3 σ	σ	1.96 σ	3 σ	σ	1.96 σ	3 σ
Fc21	6.01	11.79	18.04	2.80	5.49	8.40	6.63	13.00	19.90
Fc36	5.54	10.85	16.61	2.47	4.85	7.42	6.06	11.89	18.19
Fc48	5.14	10.08	15.43	2.33	4.57	7.00	5.65	11.07	16.94
Fc60	4.89	9.59	14.68	2.18	4.28	6.55	5.36	10.50	16.08

によりそれらを累積して材料品質変動による推定誤差の合成を行い、更に試験固有の総合誤差(表-6参照)を累積して品質管理試験としての全体誤差を求めた。計算結果を表-8に示す。この結果、事前の材料品質試験結果を用いて単位水量試験を長期間行った場合には、品質管理試験としての全体誤差は95%信頼限界で±10~13kg/m³と、やや大きい結果となった。

4. 本試験法の現場適用事例

4.1 現場適用A

生コン工場で製造した高強度コンクリートを、建設現場までアジテータ車で30分輸送して、コンクリート荷卸時に単位水量試験を実施した。試験は2日間で現場に打設した全アジテータ車12台について行った。

使用材料とコンクリート調査を表-9、-10に示す。材料の各種試験は、予め工場のサイロから材料を採取して行なった。

計量器に入る各バッチの骨材を採取して105℃加熱乾燥により表面水率を測定して、各バッチの材料計量値と骨材の表面水率測定値から実施調査の単位水量を計算で求め、単位水量試験結果と比較した。ほかにスラン

プとスランプフロー試験と、圧縮強度試験(標準養生、材齢28日)も実施した。結果の一覧を図-2に示す。

単位水量試験結果の推定値は、表面水測定から求めた実施調査の単位水量と多少のずれはあるものの、変動の傾向はよく一致している。

骨材の表面水率については、細目山砂(細骨材1)は表面水が大きく、表面水率測定値と単位水量推定値は変動の傾向がよく一致している。細骨材の表面水はコンクリート製造の際の設定値に比べ、実際の表面水の変動の方が大きいため、それが単位水量に影響したと考える。

スランプとスランプフローも単位水量の変動とよく対応し、流動性の大きいコンクリートは水量が大きかった。

表-9 使用材料

材料名	種類および品質
セメント	普通ポルトランドセメント (H社製), 比重3.15, 密度 3.183(g/cm ³)
細骨材1	鹿島産山砂, 表乾比重2.59, 吸水率2.01%, 粗粒率2.06, 密度 2.701(g/cm ³)
細骨材2	葛生産砕砂, 表乾比重2.62, 吸水率2.48%, 粗粒率3.24, 密度 2.739(g/cm ³)
粗骨材	葛生産砕石, 表乾比重2.68, 吸水率1.38%, 粗粒率6.63, 密度 2.733(g/cm ³)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 (N社製)

註) 密度は水中質量法により測定

表-10 コンクリートの計画調査

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					
			水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤
					1	2		
28.0	22	2.0	165	588	440	237	1002	12.35

また、計画調合の単位セメント量と単位水量推定値から計算した、各アジテータ車のコンクリートのセメント水比と、圧縮強度の関係を図-3に示す。セメント水比は圧縮強度とよく相関していて、単位水量の大きい方が圧縮強度が小さいことがわかる。この結果から計画調合が同じ生コンクリートにて、圧縮強度のばらつきは主として単位水量の変動の影響を受けていることがわかる。

以上の結果から、単位水量試験の推定値は実際の単位水量を表し、水量の変動はコンクリートの流動性や強度に大きな影響を及ぼしていることがわかる。また、単位水量試験がコンクリートの品質を管理するために重要であることが明らかになった。

4.2 現場適用B

生コン工場で製造した2種類の高強度コンクリートについて、生コン工場にて出荷前のアジテータ車からコンクリート試料を採取して、単位水量試験を実施した。

使用材料とコンクリート調合を表-11、-12に示す。材料の絶乾密度測定と骨材試験は実験開始前に予め工場のサイロから採取して行い、実験期間中はその試験値を用いて単位水量を算出した。単位水量測定は1日2回行い、F60調合を3ヶ月間で18日、続いてF54調合を2ヶ月間で10日実施した。また圧縮強度試験用供試体を同時に採取して標準養生で材齢7日、28日で試験を行った。

各調合のコンクリートの単位水量測定結果を図-4に示す。両調合とも単位水量推定値の全平均は計画調合値よりやや小さく、標準偏差 σ は約10kg/m³であった。

また、計画調合の単位セメント量と実測の単位水量推定値からそれぞれのセメント水比を計算して、圧縮強度測定結果との関係を求め図-5に示す。同じ計画調合でも単位水量の変動に応じてセメント水比が変動し、それによって圧縮強度が変動する傾向がみられ、2種類の調合に関

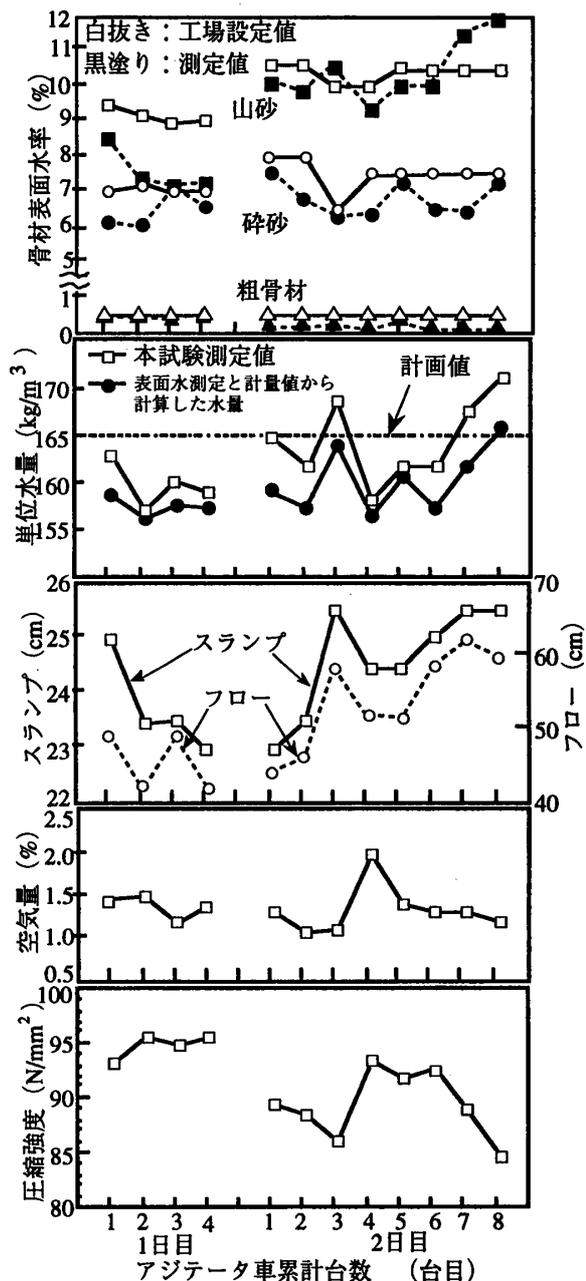


図-2 実験結果一覧

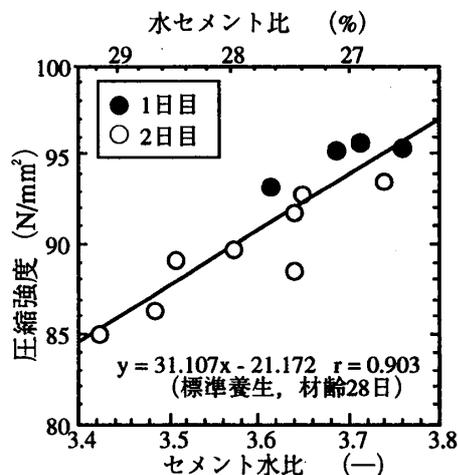


図-3 測定から求めたセメント水比と圧縮強度の関係

係なくセメント水比と圧縮強度はよい相関性があることがわかる。現場適用Bの方が現場適用Aの場合より相関性が低いのは、現場適用Aでは2日間であるのに対し、現場適用Bでは測定期間が5ヶ月間と長かったため、使用材料の品質が変動して、測定した単位水量推定値に影響したことが考えられる。

それゆえ、材料の密度などの品質試験の測定頻度を高めて単位水量試験にそれらの数値を用いれば、単位水量推定値の精度は更に向上することが予想される。以上の結果から、本単位水量試験がコンクリートの強度管理に役立つことが明らかになった。

5. まとめ

フレッシュコンクリートの空中での質量と水中での見掛けの質量を測定することにより、単位水量を推定する水中質量法は、材料の絶乾密度や粒度などの品質を把握していれば、十分な精度のあることがわかった。

レディーミクストコンクリートの現場測定実験により、本単位水量試験はコンクリートの調合管理や、流動性、強度管理に有効であることを確認した。

今後、レディーミクストコンクリート工場の骨材品質の変動を調査してその実態を把握することにより、骨材の密度や粒度の変動幅を考慮した本試験法の品質管理への適用を考えたい。

参考文献

- 1) 吉兼享：フレッシュコンクリート中の単位水量値測定の現状と課題，コンクリート工学，Vol.27, No.10, pp.5-14, 1989
- 2) 若松岳ほか：フレッシュコンクリートにおけ

表-11 使用材料

材料名	種類および品質
セメント	普通ポルトランドセメント (C社製)，比重3.15，密度 3.233(g/cm ³)
細骨材1	岡山産海砂，表乾比重2.53，吸水率2.14%，粗粒率2.34，密度 2.656(g/cm ³)
細骨材2	男鹿島産砕砂，表乾比重2.50，吸水率3.37%，粗粒率3.01，密度 2.669(g/cm ³)
粗骨材1	男鹿島産碎石，表乾比重2.63，吸水率1.14%，粗粒率6.34，密度 2.679(g/cm ³)
粗骨材2	男鹿島産碎石，表乾比重2.64，吸水率0.954%，粗粒率7.15，密度 2.680(g/cm ³)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 (K社製)

註) 密度は水中質量法により測定

表-12 コンクリートの計画調合

調査記号	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤
						海砂	砕砂		
F60	30.0	23	2.0	175	583	509	221	884	8.745
F54	34.0	23	2.0	175	515	548	238	884	7.725

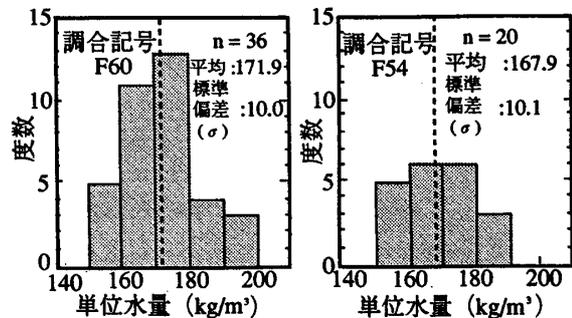


図-4 単位水量推定値のヒストグラム

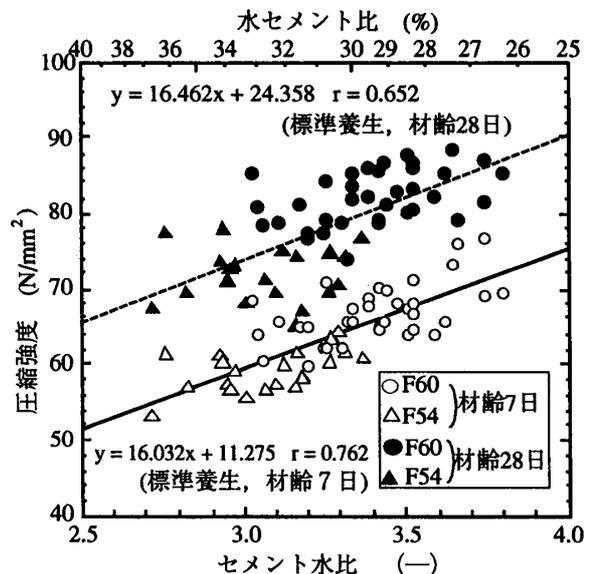


図-5 測定から求めたセメント水比と圧縮強度の関係

る水セメント比の簡易推定方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.1, pp.391-396, 1997