

論文 減圧乾燥方法を用いたフレッシュコンクリートの単位水量・水セメント比の推定について

中村博之^{*1}・平田隆祥^{*2}・十河茂幸^{*3}

要旨：コンクリート構造物の品質保証の観点から、コンクリートを打ち込む前に、その品質を把握し、打ち込まれるコンクリートの品質が妥当なものであるかどうかを判断する技術が求められている。そのため、レディーミクストコンクリートの受け入れ検査として、所定の配合であることを検査することが重要である。本研究では、フレッシュコンクリートの配合を推定する方法として、減圧乾燥方法を用いた単位水量の検査方法と、空気量ほかの測定結果をもとに、配合の推定を行う方法について検討した。

キーワード：減圧乾燥、単位水量、水セメント比、品質保証

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性能保証を行う上で重要である。硬化コンクリートの性能としては、強度、耐久性、乾燥収縮特性、クリープ特性、防錆性などがあり、これらの性能をコンクリートを打ち込む前に検査する技術が求められている。

コンクリートを打ち込む前に、打ち込むコンクリートの配合が推定できれば、単位水量や水セメント比により、硬化後の強度、耐久性などがある程度予測可能となり、コンクリートの受け入れの可否の判定の指標となりうる。そして、荷受け後は、適切な施工を行うことによって、コンクリートの品質を保証することができる。

現在のところ、レディーミクストコンクリートの受け入れ検査技術として、水セメント比、単位水量の測定方法など、種々の試験方法が提案されている^{1), 2)}。その測定方法の多くは、試料採取に伴うばらつきの消去が難しかったり、配合が変化すると絶対値が得られ

ない場合があり、実用化の面で検査の信頼性を高めることが課題となっていた³⁾。そこで、本研究では、できるだけ試料に手を加えずコンクリートの水量を直接測定する方法として、減圧乾燥方法を採用し、コンクリートの乾燥水量から配合推定を行う方法について検討を行うものである。

2. 実験概要

2.1 減圧乾燥方法

実験に用いた減圧乾燥装置は、試料を大気圧以下の環境下に置くことで、試料中の水分を沸騰させるものであり、試料を高温に加熱させることなく、乾燥させることができる装置である。この装置を用いて、フレッシュコンクリートの乾燥水量の経時変化から単位水量を求めた。単位水量検査の試料容量は、スランプ試験の容量が5.5 l、空気量試験（ISO 4848）が5 l以上、圧縮強度（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$:3本）が4.7 lであるとするを考慮し、容量5 lのフレッシュコンクリートを試料容量とした。

実験に用いた減圧乾燥装置の外観を図-1

*1 大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員 工修(正会員)

*2 大林組技術研究所 土木第三研究室 研究員 (正会員)

*3 大林組技術研究所 土木第三研究室 室長 工博(正会員)

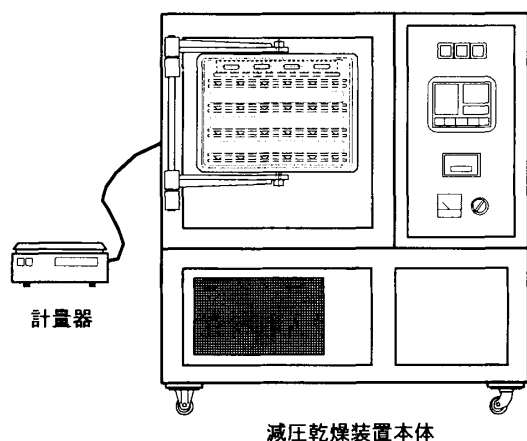


図-1 減圧乾燥装置

に、装置の仕様を表-1に示す。図-2に減圧乾燥方法による配合推定のフロー図を示す。

減圧乾燥装置は、試料の乾燥前と乾燥後の質量差を試料中に含まれている水量として測定するものであり、これをコンクリートの乾燥水量と呼ぶこととした。乾燥水量から単位水量を算定するため、以下の式によって求めるとした。ここで、セメント量、粗骨材量は設計配合通りであると仮定し、細骨材量は、算定した水量およびセメント量、粗骨材量の設計値、空気量の測定値から求めるとした。

$$W = (M \times W_1) / (M_1 - W_1) / (1 + W / (M_1 - W_1)) - Q_s - Q_g \quad (1)$$

W : 単位水量 (kg/m^3)

M : 単位容積質量 (kg/m^3)

W_1 : 減圧乾燥による測定水量 (kg)

M_1 : 試料の乾燥前質量 (kg)

Q_s : 細骨材に含まれる水量 (kg/m^3)

Q_g : 粗骨材に含まれる水量 (kg/m^3)

2.2 空気量と単位容積質量による水セメント比の推定方法

この方法は、既往の研究⁴⁾によるものであり、材料の密度が不変であるとの仮定のもとに、空気量を除いたコンクリートの単位容積質量に着目し、これらの値から水セメント比を

表-1 減圧乾燥装置の仕様

乾燥室内寸法	400 ^W × 475 ^D × 300 ^H
真空ポンプ圧力	0.133 kPa ~ 大気圧
真空ポンプモータ	0.4 kW, AC 200V
冷凍機消費電力	0.6 kW, AC 200V
ヒータ電力	300W × 1段 600W × 2段 700W × 1段, 計 1.6kW
計量器仕様	電子ハカリ, 最大 6200g, 最小 0.1g

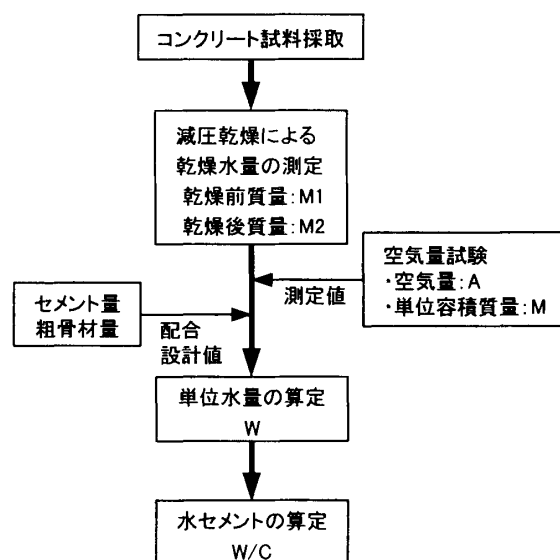


図-2 減圧乾燥方法による算定フロー

算定するものである。水セメント比の算定方法は、以下に示す式により導き出される。

$$T = W_T + C_T + A_T \quad (2)$$

$$W_T / \rho_w + C_T / \rho_c + A_T / \rho_a = 1000 \quad (3)$$

$$\rho_a = (S + G) / (S / \rho_s + G / \rho_g) \quad (4)$$

ここに、

T : 空気量を含まないコンクリートの単位容積質量 (kg/m^3)

W_T : 空気量を含まないコンクリートの単位水量 (kg/m^3)

C_T : 空気量を含まないコンクリートの単位セメント量 (kg/m^3)

A_T : 空気量を含まないコンクリートの単位骨材量 (kg/m^3)

表-2 使用材料

材 料	記号	種 類	比重	性質・成分
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16	JIS A 5210 規格品
細骨材	S	木更津産陸砂	2.60	吸水率：1.80%
粗骨材	G	青梅産碎石	2.66	Gmax 20mm 吸水率：0.98%
混和剤	Ad	AE減水剤	1.25	リグニンスルホン酸化合物 及びポリオール複合体
水	W	上水道水	1.00	

表-3 コンクリートの配合

配合 No.	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				Ad (C×%)
				W	C	S	G	
①	20	55.0	45.0	185	336	776	971	0.25
②			42.0	165	300	759	1072	0.25
③				150	273	785	1109	0.25
④		65.0	42.0	165	254	775	1095	0.25
⑤		45.0	42.0	165	367	736	1040	0.25
⑥		60.1	42.0	178	296	748	1095	0.25
⑦		49.9	42.0	152	305	770	1088	0.25

S：単位細骨材量(kg/m³)

G：単位粗骨材量(kg/m³)

ρ_w, ρ_c, ρ_A ：水，セメント，骨材の比重

ρ_s, ρ_g ：細骨材，粗骨材の表乾比重

$$W_t/C_t = (1000/C_t) \times \{ \alpha - (\alpha - 1) \times T/1000 \} + \beta \quad (5)$$

ここに、 $\alpha = 1 / (1 - 1/\rho_A)$

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

コンクリートの空気量と単位容積質量の測定結果から、空気量を除いたコンクリートの単位容積質量Tは、以下の式によって求めることができる。

$$T = M / (1 - A/100) \quad (6)$$

ここに、A：空気量(%)

空気量の測定は、JIS A 1128「空気室圧力方法（注水法）」により行い、単位容積質量は空気量試験の容器（約7 l）を用いて感量0.1 gのはかりで測定するとした。また、配合推定は、配合設計に用いたセメント量、粗骨材量を用いて、算定を行うとした。ここで、この方法による測定方法は、便宜上水セメント比推定方法と呼ぶこととする。

2.3 フレッシュコンクリートの洗い分析試験方法による配合推定

練り混ぜられたコンクリートの配合を直接推定するために、コンクリート試料からJIS A 1112による方法により骨材を取り出し、この測定値から配合推定を行うとした。試料は、空気量試験で測定したものを扱い、配合の計算は、空気量試験で測定した空気量、単位容積質量、コンクリート容積により算定を行うとした。ここで、この方法による測定方法は、便宜上洗い分析方法と呼ぶこととする。

2.4 使用材料および配合

実験に使用した使用材料を表-2に、コンクリートの配合を表-3に示す。配合は、 $W/C=55\%$ 、 $W=165\text{kg/m}^3$ の配合を基準に、水セメント比を一定にして単位水量を変化させた場合と、単位水量が一定で水セメント比が異なる場合の合計5ケースを設定した。また、配合No. ⑥, ⑦は、前述のケースとは関係なく、単位水量 165kg/m^3 から水量を増やした場合と、減じた場合の2ケースを設定した。空気量は、4.5%を目標値に混和剤添加量を調整した。また、コンクリートの練り混ぜには、60lの二軸強制練りミキサを使用し、1バッチの練り上がり容量を55lとした。

3. 実験結果および考察

3.1 減圧乾燥の予備実験

試料中の水分量が、減圧乾燥によりどの程度の乾燥度に到達しているかを確認する必要があるため、乾燥水量の経時変化を求めた。図-3に測定結果の一例を示す。測定開始から22分後においては、約94%の水量が蒸発しており、25分以降の乾燥水量の変化は小さくなり、乾燥速度が減少していることが分かる。今回の測定では、乾燥水量の変化がほぼ一定になってきた38分の時点で測定を一旦中段し、この時点の乾燥度を求めた。試料中に含まれていた全水分量は、減圧乾燥をさらに継続させ、試料の質量変化が一定になることを確認した時点の水量とした。この値と38分時点の測定結果の比を乾燥度と定義することとした。測定の結果、乾燥度は96.8%となった。この値を単位水量の算定を行う際の補正係数とした。

3.2 配合推定結果

(1) 単位水量

図-4に減圧乾燥方法で求めた単位水量、図-5に空気量と単位容積質量による水セメント比推定方法と、フレッシュコンクリートの洗い分析試験方法による配合推定方法による結果を示す。なお、図中の横軸は設計配合の

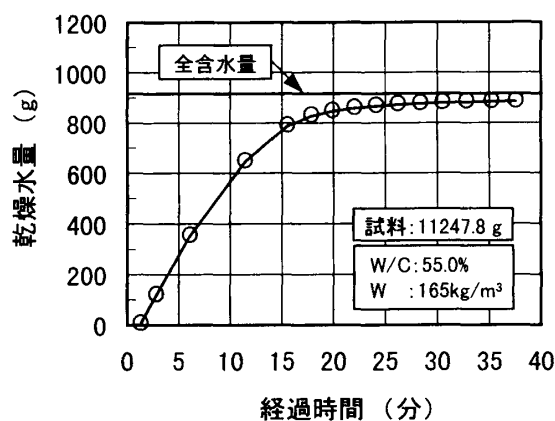


図-3 乾燥水量の時間変化

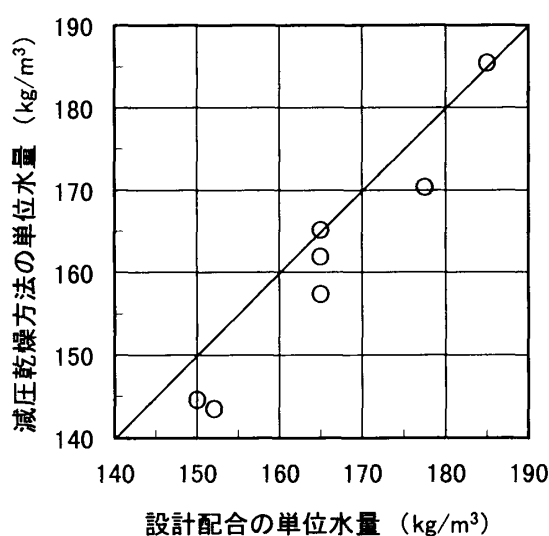


図-4 設計配合と減圧乾燥方法の単位水量

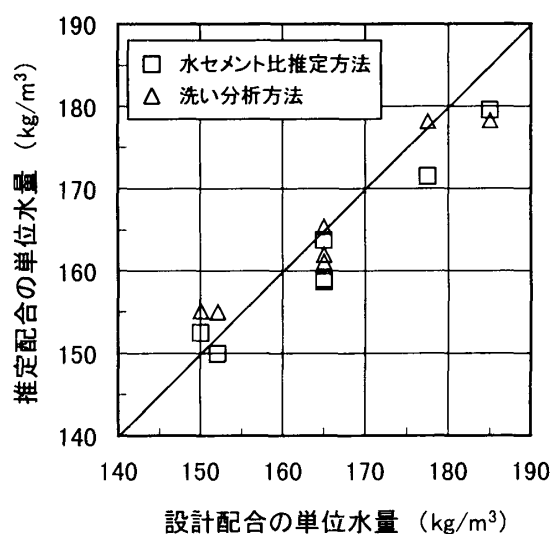


図-5 設計配合と推定配合の単位水量

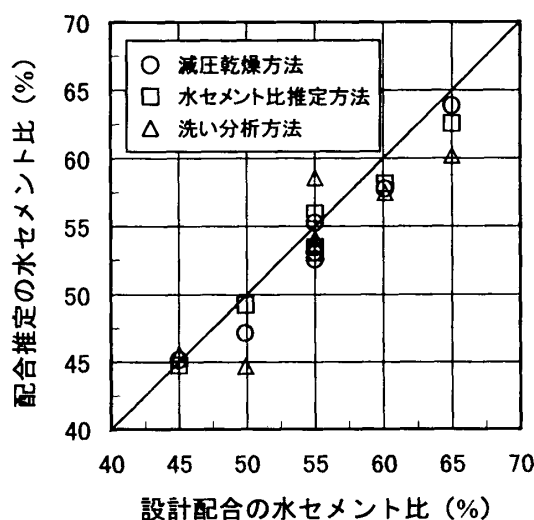
表－４ 設計配合と各種推定値との比較

配合 No.	設計配合			減圧乾燥方法				W/C推定方法				洗い分析方法			
	W (kg/m ³) (1)	W/C (%) (2)	測定空 気量 (%) (3)	W (kg/m ³) (3)	設計値 との差 (kg/m ³) (3)-(1) (4)	W/C (%) (4)	設計値 との差 (%) (4)-(2) (5)	W (kg/m ³) (5)	設計値 との差 (kg/m ³) (5)-(1) (6)	W/C (%) (6)	設計値 との差 (%) (6)-(2) (7)	W (kg/m ³) (7)	設計値 との差 (kg/m ³) (7)-(1) (8)	W/C (%) (8)	設計値 との差 (%) (8)-(2) (9)
①	187.0	55.0	3.45	187.3	0.3	55.1	0.1	181.3	-5.7	53.3	-1.7	179.9	-7.1	53.4	-1.6
②	166.0	55.0	3.95	158.0	-8.0	52.4	-2.6	159.6	-6.4	52.9	-2.1	161.7	-4.3	53.9	-1.1
③	151.6	55.0	3.45	145.8	-5.8	52.9	-2.1	153.9	2.3	55.8	0.8	156.6	5.0	58.4	3.4
④	165.1	65.0	4.45	161.7	-3.4	63.7	-1.3	158.5	-6.6	62.4	-2.6	161.8	-3.3	60.0	-5.0
⑤	165.3	45.0	4.35	165.1	-0.2	45.0	0.0	163.8	-1.5	44.6	-0.4	165.3	0.0	45.4	0.4
⑥	178.9	60.1	3.65	171.6	-7.3	57.6	-2.5	172.7	-6.2	58.0	-2.1	179.4	0.5	57.3	-2.8
⑦	153.0	49.9	4.05	143.9	-9.1	47.0	-2.9	150.4	-2.6	49.1	-0.8	155.4	2.4	44.5	-5.4

単位水量を示しており、算定結果は、示方配合（空気量 4.5%）に換算した値を示している。

練り混ぜられたコンクリートの単位水量の真値は、実際のところ不明である。今回は、実験室で練り混ぜられたコンクリートが対象であるため、ここでは、練り上がったコンクリートは示方配合通りであるという仮定のもとに検討を進めることとした。

図－４より、減圧乾燥方法で求めた単位水量は、設計値と比較すると全体的に小さくなっている。また、同一単位水量を設定した配合でも、結果にばらつきが生じている。これらの原因としては、単位水量の算定で用いている乾燥度が影響しているものと考えられる。乾燥度の算定では、予備実験において、10 時間以上の減圧乾燥を行った後の水量を試料中に含まれる全水量をとし求めた。そのため、途中で水和反応などによって水が消費され、実際より水量が少なく測定されている可能性が考えられる。また、厳密には、30 分の乾燥過程においても水和反応により水量が消費されていると考えられる。これらの要因によって、算定に用いた乾燥度が、実際より過大評価していることが影響していると思われる。したがって、水量算定に乾燥度を用いる場合には、水和反応などによる影響を適切補正して乾燥



図－６ 設計配合と推定配合の水セメント比

度を求めることによって、単位水量の算定精度が向上するものと思われる。

図－５より、水セメント比推定方法と洗い分析方法は、推定結果が設計値に近くなっているといえる。

表－４に空気量の測定値に換算した設計配合の単位水量と各種推定方法で得られた推定結果の比較を示す。表－４より、練り上がったコンクリートは、空気量が設計値より若干小さかったことから、水量が増加している配合もある。減圧乾燥方法では、全体的に値が小さい結果となっているが、比較的に設計値に近い

表-5 洗い分析方法と各種測定値との比較

配合 No.	洗い分析方法			減圧乾燥方法				W/C推定方法				設計配合			
	W	W/C	測定空 気量	W	試験値 との差	W/C	試験値 との差	W	試験値 との差	W/C	試験値 との差	W	試験値 との差	W/C	試験値 との差
	(kg/m ³) (1)	(%) (2)	(%)	(kg/m ³) (3)	(kg/m ³) (3)-(1)	(%) (4)	(%) (4)-(2)	(kg/m ³) (5)	(kg/m ³) (5)-(1)	(%) (6)	(%) (6)-(2)	(kg/m ³) (7)	(kg/m ³) (7)-(1)	(%) (8)	(%) (8)-(2)
①	179.9	53.4	3.45	187.3	7.4	55.1	1.7	181.3	1.4	53.3	-0.1	187.0	7.1	55.0	1.6
②	161.7	53.9	3.95	158.0	-3.7	52.4	-1.5	159.6	-2.1	52.9	-1.0	166.0	4.3	55.0	1.1
③	156.6	58.4	3.45	145.8	-10.8	52.9	-5.5	153.9	-2.7	55.8	-2.6	151.6	-5.0	55.0	-3.4
④	161.8	60.0	4.45	161.7	-0.1	63.7	3.7	158.5	-3.3	62.4	2.4	165.1	3.3	65.0	5.0
⑤	165.3	45.4	4.35	165.1	-0.2	45.0	-0.4	163.8	-1.5	44.6	-0.8	165.3	0.0	45.0	-0.4
⑥	179.4	57.3	3.65	171.6	-7.8	57.6	0.3	172.7	-6.7	58.0	0.7	178.9	-0.5	60.1	2.8
⑦	155.4	44.5	4.05	143.9	-11.5	47.0	2.5	150.4	-5.0	49.1	4.6	153.0	-2.4	49.9	5.4

値が得られているものと思われる。乾燥度を適切に評価することで値が設計値に近づくといえる。

(2) 水セメント比

図-6に水セメント比の結果を示す。結果より、各方法の水セメント比は、設計値に比べて全体的に若干小さい傾向であるといえる。洗い分析方法において推定した結果は、実測値から算定しているので、仮定条件が含まれない。このことから、洗い分析方法による結果は、他の方法に比べて練り上がりコンクリートの配合組成を比較的良好に表しているものと考えられる。洗い分析方法の結果と他の推定結果を比較してまとめた結果を表-5に示す。洗い分析方法と減圧乾燥方法を比較すると、水セメント比で最大5.5%異なっている場合も見られるがおおむね近い値が得られていると思われる。

4. まとめ

本研究によって得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 減圧乾燥方法では、コンクリートに含まれる水分が直接測定されるので、水和反応に伴って減じる水量を考慮しないで測定ができる。

(2) 減圧乾燥方法により求められる単位水量は、乾燥度に伴う補正を適切に定めれば、ある程度精度良く推定することができる。

(3) 減圧乾燥方法の算定の中で、骨材量を特定できれば、さらに算定精度が向上する。

今後は、減圧乾燥方法による配合推定の精度向上のために、乾燥度の設定などの検討を行う必要があり、研究を継続する予定である。

参考文献

- 1) 小林茂敏, 高橋弘人, 森濱和正: フレッシュコンクリートの単位水量迅速測定方法に関する実験的検討, コンクリート年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, pp. 307-312, 1990
- 2) 田中秀和, 河野広隆, 加藤敏二: 高温加熱による単位水量迅速判定方法の検討, コンクリート年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 301-306, 1998
- 3) 吉兼 亨: 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. 10
- 4) 若松 岳, 相原 功, 近松竜一, 平田隆祥: 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, コンクリート年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 391-396, 1997