

論文

[1052] フレッシュコンクリートの単位水量迅速判定法に関する
実験的検討

正会員 小林 茂敏（建設省土木研究所）

正会員○高橋 弘人（建設省土木研究所）

正会員 森濱 和正（建設省土木研究所）

1. はじめに

コンクリートの品質を代表する圧縮強度は所定の材令を経過した後に試験されているため、仮に試験の結果不合格となった場合の対応は極めて困難となる。このため、コンクリート打設の可否を現場で判断できる試験方法が必要とされる。コンクリートの水セメント比は、硬化コンクリートの圧縮強度の直接的な因子であるが、このうち単位セメント量は生コンの製造時に自動計量記録によって確認できるものの、フレッシュコンクリートのみならず硬化コンクリートの耐久性などの諸特性に大きな影響を及ぼす単位水量は、骨材の粒度分布、粒形あるいは表面水率変動しやすいことや、所定のスランプに適合するよう単位水量を随時補正しているため、練りまぜに用いた真の値は正確には判明しないのが現状である。

さらに、流動化コンクリートや水中不分離性コンクリートなどフレッシュコンクリートのコンシステンシーが判然としないものや単位水量が極端に少ない超硬練りコンクリートを使用する現状からも単位水量確認の必要性は高まっていると考えられる。

筆者らは、昨年種々のフレッシュコンクリートの早期品質判定に関する比較実験の結果から単位水量の早期判定試験にはコンクリートを試料とするのがよいことを報告¹⁾したが、判定原理が単純でコンクリートを直接試料とした大型乾燥炉試験装置（以下、乾燥炉法）における単位水量の測定精度は95%信頼限界で $10\text{kg}/\text{m}^3$ 程度配合値と差があり、このため測定精度の向上が課題として残されていた。そこで今回は、乾燥炉法によるフレッシュコンクリートの単位水量判定の精度の向上について検討することとした。

2. 乾燥炉法の概要

大型乾燥炉試験装置は、5kgのフレッシュコンクリートを入れた容器を試験槽内に挿入し、400℃に加熱してある蓄熱層を容器に密着させてフレッシュコンクリートを乾燥させるものである。フレッシュコンクリート試料中の水量は乾燥試験前後の重量差から求め、これから単位水量を計算によって求める。

乾燥炉法による含水率および単位水量の算出は以下による。

$$\text{含水率} = (M_0 - M_1) / M_1 \times 100 \quad (\%) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{単位水量} = M_c \times (M_0 - M_1 + S_0 \times Q_s + G_0 \times Q_g) / M_0 \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 M_0 ：試料重量 (kg)、 M_1 ：乾燥後の試料重量 (kg)

M_c ：コンクリートの単位容積重量 (kg/m^3)

S_0 ：試料中の細骨材量 (kg)、 Q_s ：細骨材の吸水率 (%)

G_0 ：試料中の粗骨材量 (kg)、 Q_g ：粗骨材の吸水率 (%)

一般のコンクリート配合では、単位水量が $\pm 5\text{kg}/\text{m}^3$ 変動すると水セメント比で1.5%前後、圧縮強度にして10数 kg/cm^2 の変動となる。これは、生コンのグレードが1ランク変わるほどのものとなる。ここで、生コンクリートの製造では水量以外の計量誤差は小さく、また、プラントでの自

動計量記録によっても管理されているとして、判定試験に関わる測定誤差をすべて単位水量の変動とみなすと、測定結果から単位水量を計算する際の測定誤差の倍率を約500倍とすれば、単位水量を $\pm 5\text{kg/m}^3$ で判定するには試験時の誤差は $\pm 10\text{g}$ （含水率にして $\pm 0.2\%$ ）以内とする必要がある。

3. 実験方法

3.1 使用材料

実験に使用した材料は、普通ポルトランドセメント（比重3.16）、細骨材（川砂、比重2.62、吸水率2.02%）、粗骨材（碎石、比重2.67、吸水率0.59%）である。

3.2 予備実験

3.2.1 乾燥重量の測定

加熱乾燥させた試料の重量測定においては、加熱された空気の上昇によって測定重量が小さくなることが考えられる。このため、コンクリート、モルタル、細骨材および容器のみを 250°C 程度まで加熱した後に乾燥炉から取り出し、熱電対で試料温度を測定しながら試料重量の経時変化を測定した。

3.2.2 骨材の吸水率

フレッシュコンクリートを加熱乾燥させて単位水量を測定するには、JIS試験法で得られた骨材の吸水率が乾燥炉法で得られた吸水率試験結果と一致することが必要である。そこで、①骨材のみの試験、②セメント、骨材、水を容器に入れただけで練りまぜていない試料の試験、を行った。①の試験は、乾燥炉法による骨材の吸水率を求めるためのものであり、②の試験は、骨材表面がセメント、水で覆われた場合でも①の結果と適合するか確認するための試験である。

3.2.3 セメントと結合する水量の影響

試料を加熱乾燥させる過程では、セメントと水分が結合することが考えられる。このため、①セメントのみの試験、②セメントと水を容器に入れただけで練りまぜていない試料の試験、を行った。①の試験は、実験に用いたセメントの含水率を確認するものであり、②の試験結果との差から結合水量が求められる。

3.3 フレッシュコンクリートの判定実験

予備実験から得られた条件にしたがって、表-1に示す7配合のコンクリートについて判定実験を行った。ここで、モルタル試料はコンクリート配合から粗骨材を除いたものとした。コンクリートの練り混ぜは、使用材料ごとに実験に用いる量のみを計量して手練りで行った。

表-1 コンクリートの配合

NO	W/C	s/a	W	C
	(%)	(%)	(kg/m ³)	
1	56.7	43.4	198.5	350.0
2	46.7		163.5	
3	36.7		128.5	
4	70.0		163.5	233.3
5	35.0	466.7		
6	46.7	50.5		350.0
7		37.9		

4. 実験結果と考察

4.1 予備実験の結果と考察

4.1.1 乾燥重量の測定

試料を加熱乾燥させた後の試料温度と試料重量の関係を示したのが図-1である。なお、基準とした重量は試料温度を 20°C にした時の重量である。 250°C 程度まで加熱した試料の重量は 20°C 時の重量に比べて4g程度小さく測定されている（単位水量にして $\text{約}2\text{kg/m}^3$ ）。このため、以後の試験での乾燥重量の測定は、試料温度を 60°C 以下にして測定したが、ここで、温度と空気の密度の式(3)に容器の容積（ 7140cm^3 ）を乗じて求めた計算値（図中の点線）は試料温度 200°C 程度から測

定値とほぼ一致している。

このことから、乾燥重量は試料温度を下げなくても計算で求めることができるといえる。

$$\sigma = 0.001293 / (1 + 0.00367 \times T) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 σ ：空気密度
(g/cm^3)

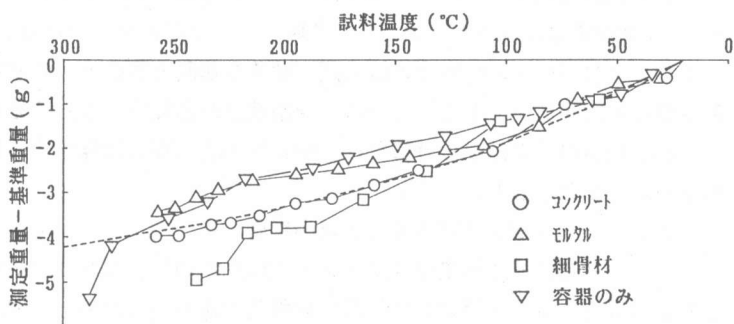


図-1 試料温度と試料重量の関係

T：温度（℃）、ここでは、試料温度と空気温度は同じとして、試料温度を用いた。

4. 1. 2 骨材の吸水率

①の骨材だけの試験の結果を図-2に示す。これより、乾燥炉法で求めた骨材の吸水率は粗骨材ではJIS試験法の結果とよく一致したものの、細骨材ではJIS試験法の結果に比べて0.23%程度大きな値となった。次に、②のセメント、骨材、水を容器に入れてだけで練りまぜていない試料の試験結果を図-3に示す。①および②の試験とも試料を直接試験用の容器に入れていることから容器以外への試料や水分の付着は考えられない。また、試料温度が300℃程度では骨材中に吸水されている水分以上の蒸発やセメントの強熱減量もないと考えられる。

ここで、今回の試験に用いた細骨材の吸水率をJISの試験法にしたがってA、B 2人の試験者が合計14回試験して求めた結果では、両者間の吸水率測定値は、平均で0.27%（最大で0.40%、最小で0.04%）の差があり、比重試験の結果でも平均0.01（最大で0.02、最小で0.00）の差があった。細骨材の吸水率を絶対比重から計算すると、表乾比重が0.01変化することで約0.39%変化することから、両者間の吸水率測定値の差は、試験を行う際の細骨材の表乾状態の判定の個人間の差に起因しているものと考えられる。

また、JIS法とASTM法による比重および吸水率測定結果を比較した報告²⁾では、同一試料を両規格で試験するとASTM法に比べてJIS法は0.1～0.6%（平均0.26%）程度吸水率が小さく測定されとしている。両規格間には、細骨材の表乾状態の判定において、ASTM法ではフローコーンへの試料の詰め方を規定しているのに対しJIS法では規定がなく、ま

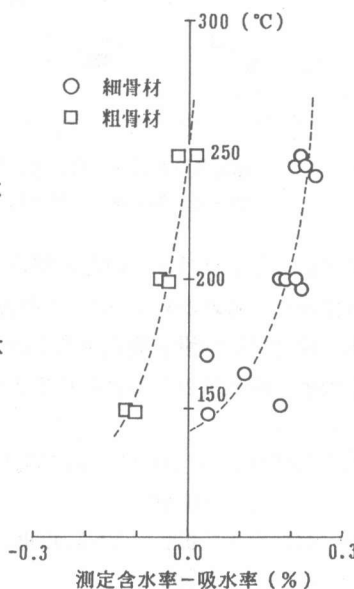


図-2 骨材の試験結果

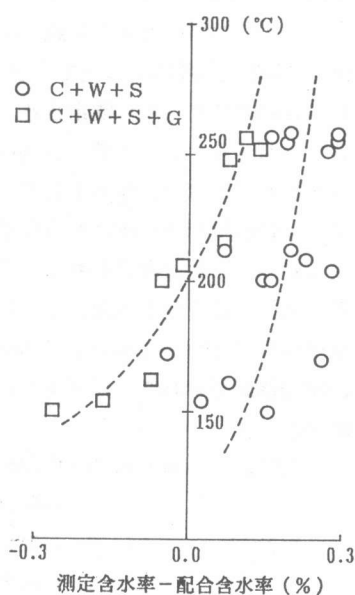


図-3 練りまぜていない試料の試験結果

た、表乾状態と判定する試料の状態もASTM法では細骨材が少しスランプした時としているのに対して、JIS法ではコーンがスランプした時とするなどの違いがある。

このように細骨材の吸水率は個人間、試験方法間で異なるものであり、この違いは細骨材の表乾状態の判定が原因であることから、今後検討が必要であると考えられる。

なお、以後の試験結果の計算では、細骨材の吸水率は乾燥炉法の骨材のみの試験で得られた結果を用いることとした。

4. 1. 3 セメントと結合する水量の影響

セメントと結合する水量は、セメント量にかかわらず試料温度が200℃以上ではセメント量に対して0.1%程度、単位水量にして0.4kg/m³程度であったものの、今回の試験に用いたセメント自体の含水分でほぼ相殺されたことから、単位水量の判定にはほとんど影響しないものとして扱うこととした。

4. 2 フレッシュコンクリート

の判定結果と考察

予備実験の結果から得られた条件のもとにモルタルおよびコンクリート試料の試験を行った。その結果、当然のことながら測定単位水量は試料温度を高くすることで配合値に近づく傾向にあるものの、モルタル試料を用いて試験した単位水量は4. 1. 2の②試料（練りまぜていない試料）の試験結果に比べて約2kg/m³程度小さく、コンクリート試料はモルタル試料に比べて試料温度200℃以上でもさらに3kg/m³ほど小さく測定されている（図-4）。ここで、試料中の水量を加熱蒸発させる上においては、骨材量が多いほど水分が蒸

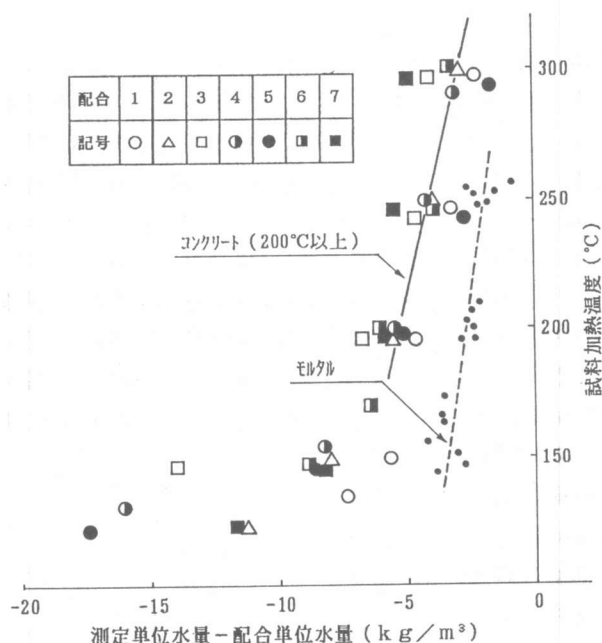


図-4 測定単位水量と試料加熱温度の関係

発しにくいことが考えられる。このため、コンクリート配合と測定単位水量の関係をみるために測定単位水量を目的変数とし、配合表から得られるW/C、s/a、Wを説明変数として試料温度ごとに重回帰分析を行ってみた。その結果、配合単位水量と測定単位水量を一次回帰したものより高い相関関係が得られた。試料温度ごとの重回帰式は以下のとおりである（式の下段の（ ）は偏相関係数）。

$$(200^{\circ}\text{C}) : w = -9.25 - 0.245W/C + 2.65s/a + 1.03W \quad (R=0.9999) \quad (4)$$

(-0.10) (0.35) (0.99)

$$(250^{\circ}\text{C}) : w = -11.0 - 1.79W/C + 14.2s/a + 1.02W \quad (R=0.9998) \quad (5)$$

(-0.27) (0.62) (0.99)

$$(300^{\circ}\text{C}) : w = -11.0 - 2.00W/C + 13.9s/a + 1.03W \quad (R=0.9997) \quad (6)$$

(-0.25) (0.54) (0.99)

ここで、 w ：測定単位水量 (kg/m^3)。

W/C 、 s/a 、 W ：それぞれ配合表から得られる水セメント比、細骨材率、単位水量。

重回帰分析の結果、配合単位水量が測定単位水量と相関が高いのは当然としても、細骨材率も影響を及ぼしていることがわかる。この重回帰式を移項して配合単位水量 W を求める式になおし、 w 、 W/C 、 s/a 、を代入して計算した結果、単位水量は $-1.1 \sim 1.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ （一次回帰式の場合は $-1.8 \sim 1.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ であった。）の範囲で精度よく判定することができた（表-2）。

4. 3 試料採取の影響

今回の試験では、試料採取の変動による誤差をなくすため、測定試料分のみを計量して手練りでコンクリート試料を練り混ぜた。すなわち、判定試験に用いた試料は、粗骨材は配合値のとおりに含まれており、それぞれの材料の計量重量の合計と練り混ぜた後の試料重量の差は、練り混ぜ容器に付着したモルタル分とみなされる。そこで、今回の試験では、モルタル部分の細骨材量および水量を補正して単位水量を計算した（これまで述べてきた結果はすべて補正した結果である）。ここで、仮にこの影響を補正せずに、測定試料は配

表-2 乾燥炉法の試験結果

試料温度 ($^{\circ}\text{C}$)	単位水量の測定誤差 (kg/m^3)			
	平均	最大	最小	標準偏差
195~200	-7.0	-7.9	-5.7	0.7
	-5.5	-6.6	-4.9	0.6
	0.0	0.4	0.0	0.2
242~250	-5.4	-7.2	-3.4	1.1
	-3.9	-5.5	-2.6	0.9
	0.0	1.0	0.1	0.6
291~301	-4.5	-6.5	-2.3	1.2
	-3.1	-4.7	-1.5	1.0
	0.2	1.1	-0.1	0.7

上段：試料採取の影響を補正せず。
中段：試料採取の影響を補正。
下段：重回帰式から求めた値。

合をそのまま縮分したものとして計算した結果を表-2に記した。試料採取の影響を補正しない場合の単位水量は補正した場合に比べ、平均 $1.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ ほどさらに小さく判定されることになる。このため、現場での試験にあたっては試験終了後に試料中の粗骨材量を測定することでモルタル分も確認し、以下の式で測定結果の補正を行うことが必要といえる。

$$\text{単位水量} = M_c \times \alpha \left(M_0 - M_1 + \alpha S_0 \times Q_s + G \times Q_0 / \alpha \right) / M_0 \dots\dots\dots (7)$$

$$\alpha = (M_0 - G') / (M_0 - G) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 G ：試験終了後に測定した粗骨材量 (kg)

G' ：配合表から計算した試料中の粗骨材量 (kg)

その他の記号は、式(2)と同じ。

5. まとめ

今回筆者らは、昨年の試験結果をもとに、現場で簡易にフレッシュコンクリート中の単位水量を判定することを目的に乾燥炉法を取り上げ、測定精度向上のための試験を行った。その結果、乾燥炉法による試験方法と測定値の補正方法は以下のようにすればよいことがわかった。

(1) 試験方法

- ① コンクリートの試料重量は、誤差倍率を小さくし、配合が縮分されたものとなるよう大きくすることが望ましい。今回の試験では、試験装置や加熱に要する時間から 5 kg とした。
- ② 試料の加熱温度は 200°C 以上とする必要がある。これに要する時間はコンクリート配合によっても差はあるが、およそ $15 \sim 20$ 分である。

③ 乾燥重量を測定した試料から粗骨材を洗いだして重量を測定する。

(2) 測定値の補正方法

① 加熱後の乾燥重量は、試料を200℃程度まで試料温度を下げれば、加熱された空気の密度の式(3)から試料温度が20℃の時の試料重量を計算で求めることができる。

② 使用材料が同じでコンクリート配合が変化する場合は、事前に200℃以上のある一定の試料温度での単位水量の測定値とコンクリート配合との関係を重回帰式で求めておけば、測定値の補正をすることができる。

③ 試料から洗いだした粗骨材量から(7)および(8)式で試料採取の影響を補正する。

(3) なお、今回の試験では、JIS試験法で得られた細骨材吸水率に比べて乾燥炉法で得られた結果が0.23%大きかった。このため、試験結果の計算では乾燥炉法で得られた吸水率を用いたが、仮に細骨材の吸水率が0.2%程度異なるとすると、単位水量測定値はおおよそ $1.4 \sim 1.8 \text{ kg/m}^3$ の影響を受ける。このため、細骨材の吸水率を正確に求める方法、特に細骨材の表乾状態の判定に関する検討が必要といえる。

以上の試験方法、補正方法に従えば、試験時間は30分程度でフレッシュコンクリート中の単位水量を $\pm 1.1 \text{ kg/m}^3$ の範囲内で精度よく判定することができた。これは、現場でのコンクリート打設にあたって単位水量の異常値のチェックに極めて有効なものと考えられる。このため、今後は現場での適用性について調査する予定である。

参考文献)

- 1) 森濱和正、高橋弘人「種々のフレッシュコンクリートの品質判定法に関する比較実験」第11回コンクリート工学年次講演概要集、1989.6
- 2) 吉兼 享、鯉江利夫、中島佳郎「表乾状態の判定に起因する細骨材の吸水率のバラツキについて」第5回生コン技術大会研究発表論文集1989.6
- 3) 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、1989.10 vol.27
- 4) 豊福俊泰、増田 隆、吉岡博幸「迅速乾燥法、R I法および自動計量記録値による単位水量の早期迅速試験法に関する研究」コンクリート工学論文集、1990.1第1巻第1号