

論文 フレッシュコンクリートの単位水量迅速推定法に関する研究

齋 充^{*1}・伊木 純一^{*2}・江守 秀次^{*3}

要旨：コンクリートの製造ならびに施工現場においてフレッシュコンクリートの単位水量を迅速に推定する方法を開発する目的で、静電容量型水分計（以下、水分計と略）を考案した。コンクリートに使用される材料や配合条件等が水分計の電気特性に及ぼす影響をモルタル実験で検討した。その結果、モルタルに含まれる絶対水量と水分計の静電容量との間に高い相関が認められ、水分計を用いてフレッシュコンクリートならびにフレッシュモルタルの単位水量を精度よくかつ簡易に推定できることを明らかにした。

キーワード：早期迅速試験、フレッシュコンクリート、水分率、静電容量

1. はじめに

コンクリートの水セメント比は、コンクリートの強度、耐久性ならびに水密性等の品質に大きな影響を及ぼすことから、コンクリート製造工場ならびに施工現場においてフレッシュコンクリートの単位セメント量および単位水量を検査することが必要であることは周知のとおりで、それらを迅速に精度よく判定するための試験方法の確立が望まれている。これまで多くの早期判定法が提案〔1、2〕されているが、試験器の操作性と経費、試験の迅速性、さらに試験の精度等に問題が残されており、十分に活用されていないのが現状である。

筆者らは、生コンクリート試験の合理化を進める立場から、フレッシュコンクリートの品質を簡易、迅速に試験するための試験法の一つとして静電容量型水分計の開発を行ってきた〔3〕。本研究は、水分計の電気特性に及ぼすフレッシュモルタル（以下、モルタルと略）の水分量、材料ならびに配合条件等の影響を明らかにし、迅速試験法としての適用を検討したものである。

2. 推定法の概要

2.1 水分計の測定原理

水の比誘電率が約80であるのに対し、セメントや骨材などの比誘電率は約2~3と大きな差がある。静電容量（誘電率）法はこの差に着目して水分量を間接的に測定する方法である。一般に水分量と静電容量の関係は次式で近似される。

$$W = K \cdot C \quad (1)$$

ここに、W：水分量、Kは材質による定数、Cは水分量Wにおける静電容量である。

水分計の試作器は、図-1のように電気特性を測定する試料容器、モルタル質量を測定するためのロードセル、そして演算、表示などを行う本体の3つのユニットから構成されている。試料容

*1 宮城県生コンクリート中央技術センター 副主任研究員（正会員）

*2 宮城県生コンクリート中央技術センター 研究員

*3 （株）ケット科学研究所 取締役

器の側面は平行平板電極になっており、中に詰められた試料の電気特性は電子回路技術を利用して検出される。

2.2 水分量の表わし方

水分計で検出する静電容量の変化は主に電極間の空間に存在する水分量に依存すると考えられるので、水分の含有程度は次式で定義される水分率で表わすことができる[4]。

$$M = \frac{m - m_0}{V} \times 100$$

(2)

ここで、Mは水分率で、m、m₀は試料の質量および絶乾質量、Vは試料の体積である。
ただし、この実験における水分量は投入水と骨材の含水の合計量を用いたので、一般的なものと区別するために基準水分率（M₀）と呼ぶことにする。

3. 実験概要

3.1 使用材料

使用したモルタルの材料を表-1～表-2に示す。

ただし、高炉スラグおよびフライアッシュは、混合セメントB種を想定して普通セメントにそれぞれ50%、15%混合して使用した。

3.2 配合条件

実験に用いたモルタルの水セメント比は40%、50%および60%の3種類である。

生コンクリートの単位水量（約140～195kg/m³）およびスランプなどの実績から、基準水分率は22～37%程度とした。また、空気量は7～11%の範囲とし、空気の影響を把握する実験では2～20%に広げた。

3.3 実験条件の組み合わせ

今回用いた実験条件の組み合わせを表-3に示す。

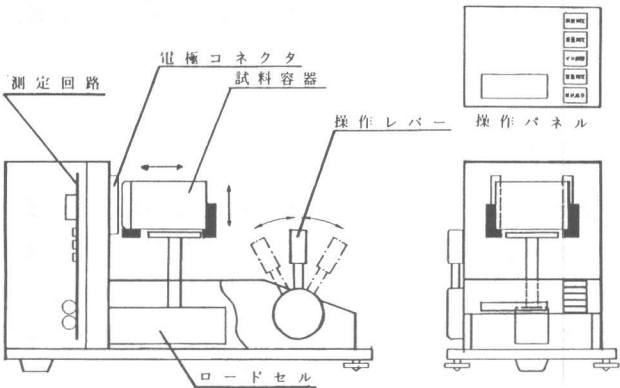


図-1 静電容量型水分計（試作品）

表-1 セメントおよび混和材料

セメント 銘柄	混 和 材 料
三菱セメント（株）普通セメント	高炉スラグ（日鐵セメント（株）君津工場）
日本セメント（株）普通セメント	フライアッシュ（東北発電工業（株）仙台工場）
住友・大阪（株）普通セメント	AE剤（エフ・ビー・ケー（株））

表-2 細骨材の品質

種 類	産 地	粗 粒 率	絶乾比重	吸水率(%)
山 砂	宮城県大和町	2.43	2.48	2.94
	宮城県大和町	2.60	2.52	2.47
	宮城県大郷町	2.21	2.55	1.72
川・陸砂	宮城県亘理町	2.46	2.48	3.18
	宮城県岩沼市	1.81	2.53	2.26
	宮城県蔵王町	2.85	2.46	3.54
	宮城県蔵王町	2.71	2.50	3.50
砕 砂	福島県新地町	2.81	2.60	1.99

3.4 実験方法

モルタルはJIS A 5308付属書 9に準じて作製し、モルタルの基準水分率は砂セメント比を変えることで調整した。また、モルタルの詰め方および空気量の計算はJIS A 1116に準じた。

測定は、①試料容器（約330 ml）にモルタルを詰め、②水分計にセットして質量、次に③静電容量、電気抵抗の順に行った。

測定は、1組 3個で行い、結果は平均値で表した。1組の試料詰めから電気抵抗測定までに要する時間は、わずか約 3分であった。

4. 実験結果および考察

4.1 特性値間の相関係数

シリーズ I の細骨材における実験の相関分析結果を表-4に示す。

基準水分率に対し危険率 1%で有意の相関が認められた特性は、静電容量、電気抵抗、空気量の順であった。基準水分率とセメント量および空気量の関係は、各々が配合条件であることから当然のことに思える。

次に静電容量と電気抵抗は基準水分率に対し0.7 以上の高い相関を示しているが、これら説明変数相互の間にも高い相関があり、また基準水分率に対する寄与は互いに打ち消すように働いた。したがって、モルタルの水分量の推定には、主に最も相関の高かった静電容量を用いて検討することとした。

表-3 実験条件の組み合わせ

シリーズ番号	実験の内容	使用材料			水セメント比
		セメント	細骨材	混和材	
I	使用材料の影響	普通セメント 3銘柄	山砂 A	高炉スラグ フライアッシュ	40% 5種類
		セメント A	山砂 3種 川・陸砂4種 砕砂 1種	—	50% 5種類
					60% 5種類
II	空気量の影響	セメント A	山砂 A	—	
III	モルタル温度の影響 (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35℃)				40% 2種類 50% 2種類 60% 2種類
IV	練り置き時間の影響 (0, 30, 60, 90分)				40% 1種類

表-4 特性値間の相関係数（細骨材シリーズ）

	単位容積質量	静電容量	電気抵抗	空気量	含有セメント容積	基準水分率
単位容積質量	1.00	-0.076	0.154	-0.739 *	0.102	-0.172
静電容量		1.00	0.729 *	0.508 *	0.731 *	0.976 * (0.978)
電気抵抗			1.00	0.183	-0.859 * (-0.864)	-0.710 *
空気量				1.00	-0.321 *	-0.472 *
含有セメント容積					1.00	0.643 *
基準水分率						1.00

【備考】（）：2次曲線回帰とした場合の相関係数 *：1%有意水準（0.231）

4.2 使用材料の影響

(1) セメントおよび混和材の影響

セメント銘柄の違いや混和材混合の影響を実験した。モルタルの基準水分率 (M_0) と静電容量 (C) の関係を図-2に示す。

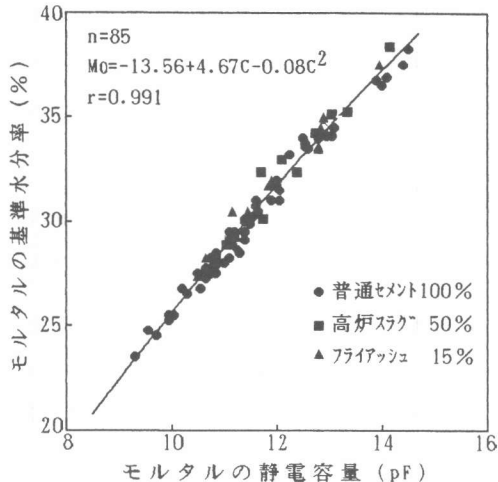


図-2 セメント、混和材の影響

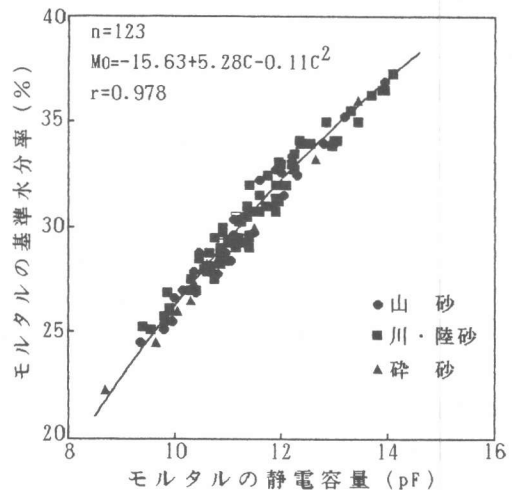


図-3 細骨材の影響

基準水分率24～38%の間で静電容量は 9～14pFに分布しており、水量の増加に従い静電容量はほぼ二次曲線的に増加した。図-2から明らかなように、水分率と静電容量は、0.991の高い相関を示した。散布図と相関係数の値から判断して、静電容量に対するセメント銘柄および混和材混合の影響は極力小さいものと考えられる。また、水セメント比の影響も同様と思われる。

(2) 細骨材の影響

比重、粒度等の品質が異なる細骨材を用いたモルタルの基準水分率と静電容量の関係は、図-3に示したように、セメントシリーズの場合と全く同じ傾向であった。相関係数はセメントシリーズに比べて、0.013小さい 0.978であった。一般に静電容量は試料の密度や温度の影響を受けるといわれており [4]、細骨材の比重、使用量等がモルタルの単位容積質量に影響を及ぼすことは明らかであるから細骨材の比重が間接的に影響したのではないと思われる。しかし、実験に使用した細骨材では、これらを裏付ける明確な相関は認められなかった。モルタル水分率の推定式では、この点も考慮して検討した。

4.3 空気量の影響

AE剤添加量を増減して、空気量を約 2～20%に調整したモルタルを用いた。

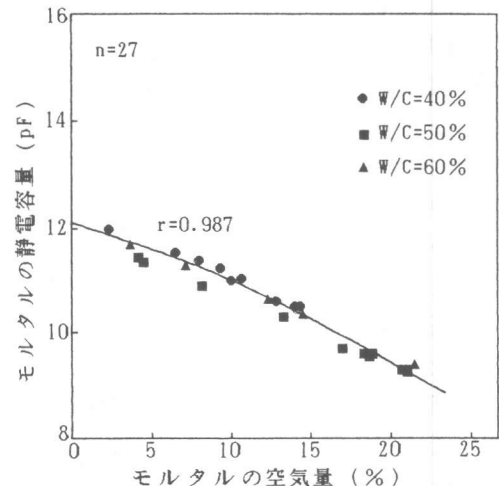


図-4 空気量の影響

セメント、細骨材が同一種類におけるモルタルの空気量と静電容量の関係を図-4に示す。モルタルの静電容量は空気量が増えるにつれて曲線を描きながら減少する傾向を示した。これは、空気量が増大した分だけ単位容積あたりに占める水分量や単位容積質量が減少することに対応した変化で、水分率推定に及ぼす影響は、水分率、静電容量同士が互いに相殺しあうので小さいと考えられる。この点は、4.6 の水分率推定式の検討で明らかになる。

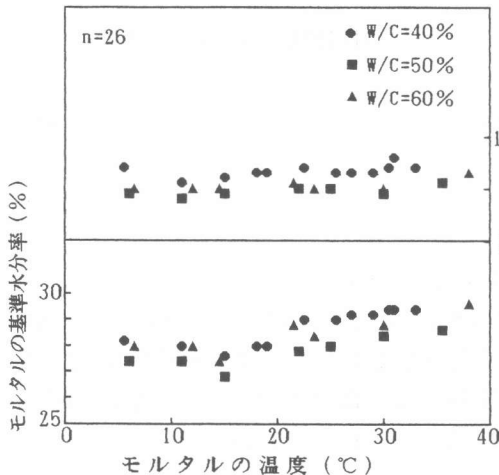


図-5 モルタル温度の影響

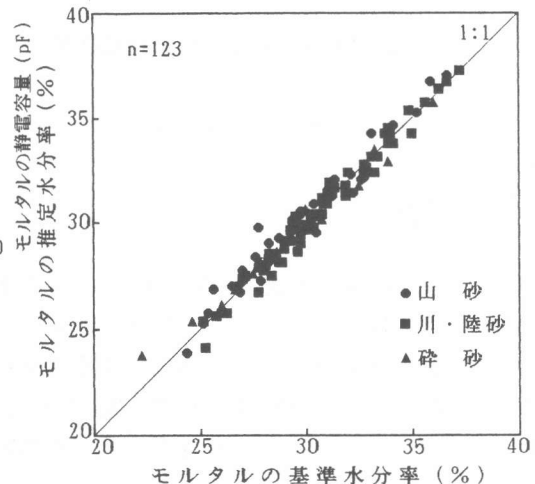


図-6 推定水分率と基準水分率の関係

4.4 モルタル温度の影響

一般に静電容量や電気抵抗等の電気特性は温度依存性がみられることから、モルタルの静電容量に対するモルタル温度の影響を実験した。モルタル温度と基準水分率および静電容量の関係を図-5に示す。

モルタルの温度が 5～35℃の間で、モルタル温度が高くなると基準水分率および静電容量とも若干増える傾向がみられた。この現象は、モルタルの空気量に温度上昇に従い直線的に減少する傾向が認められたことから、モルタル温度による空気量変動の影響と考えられる。ただし、基準水分率と静電容量の変化は互いに相殺される傾向にあるので、水分率推定に及ぼす影響は小さいと判断される。

4.5 練り置き時間の影響

通常、生コンクリートは製造されてから打設されるまでの許容時間を90分以内と規定されている。そこで、経過時間が静電容量に及ぼす影響について実験した。実験には、W/C=40%のコンクリートを50ℓ準備し、練り上がりから90分経過まで30分間隔ごとに5mmふるいでウェットスクリーニングしたモルタルを使用した。

ウェットモルタルの静電容量 (11.79→11.53pF) と単位容積質量 (2.202→2.169 kg/ℓ) は、経過時間とともにほぼ直線的に減少する傾向がみられたが、その差は小さく測定誤差の範囲内と考えられる。したがって、水分率推定に及ぼす練り置き時間の影響は無視した。

4.6 モルタル水分率の推定

水分計の諸特性値からモルタル水分率を推定するために、細骨材の影響（シリーズⅠ）の実験結果について重相関分析を行った。基準水分率に対する相関は静電容量のみでもかなり高かった

(0.978) が静電容量と単位容積質量の平方根の比を説明変数とすることにより、相関係数は0.985に向上した。この変数を用いた水分率推定の関数は次のようになる。

$$X = \frac{C}{\rho^{1/2}} \quad (3)$$

ここに、Xは水分推定特性、Cは静電容量 (pF)、 ρ は単位容積質量 (kg/l) である。

$$M = -21.85 + 9.09X - 0.32X^2 \quad (r=0.985) \quad (4)$$

Mは推定水分率 (%) である。

(4) 式から求めた推定水分率と基準水分率の関係を図-6に示す。

図-6 から明らかなように、(4) 式は基準水分率の推定によく適合しており、モルタルの静電容量と単位容積質量の2変数から高い精度で水分率、しいてはコンクリートの単位水量を推定できることがわかった。推定の平均誤差は1.7%で、標準偏差は0.22%であった。例えば、単位水量が160kg/m³のコンクリートの場合、 $\pm 2\sigma$ の推定誤差は約 $\pm 4\text{kg/m}^3$ となる。

5. まとめ

本研究によって得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 限られた実験ではあるが、モルタルの静電容量と質量 (単位容積質量) の計測値から、3%以下の精度でモルタルの水分量を推定できた。ウェットスクリーニングする必要はあるが、十分フレッシュコンクリートの単位水量推定試験に適用できると考えられる。
- 2) モルタルの静電容量に対する温度や練り置き時間等の影響は多少あるが、同時に単位容積質量を計測することで、その影響を相殺することが可能である。
- 3) 本水分計は、内蔵されているマイクロコンピュータで回帰定数を用いた演算を行い水分量を即座にディスプレイならびにプリンターに表示できる。また軽量で小型化が容易であり、電源は乾電池でも可能であるから、簡易迅速試験器の必要条件を満足している。

なお、現在フレッシュコンクリートによる実験を行っており、新しい迅速試験法として提案したいと考えている。

参考文献

- [1] 日本建築学会：付2. フレッシュコンクリートの単位水量推定方法、高性能AE減水剤コンクリートの調合・製造および施工指針 (案)・同解説、pp. 94-111、1992
- [2] 福富俊泰ほか：迅速乾燥法、RI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、Vol. 1、No. 1、PP. 165-176、1990. 1
- [3] 斎 充ほか：フレッシュコンクリートの単位水量測定技術について、第8回生コン技術大会研究論文集、PP. 139-144、1995
- [4] 日本機械学会：湿度・水分計測と環境のモニタ、技報堂出版、1992