

論文 静電容量型水分計によるフレッシュコンクリートの単位水量推定

斎 充^{*1}・伊木 純一^{*2}・沓掛 文夫^{*3}

要旨：フレッシュコンクリートの単位水量を簡易迅速に推定する方法として、モルタル中の水分量が静電容量に比例する原理を利用した静電容量型水分計の適用について実験的検討を行った。その結果、推定単位水量は示方配合にほぼ一致し、本試験方法が単位水量の迅速推定試験として十分な精度と実用性を有していることがわかった。推定単位水量はコンクリートの空気量やモルタル採取等のバラツキの影響を受けるが、これらの点を考慮した補正を行うことにより十分な精度が得られることが明らかになった。

キーワード：静電容量型水分計、迅速試験、フレッシュコンクリート、単位水量

1. はじめに

コンクリート構造物の品質確保ならびに耐久性向上を図るには、施工現場における生コンクリート品質チェックのひとつとして、単位水量検査の必要性が不可欠とされ、そのニーズはさらに高まっているようである。現にユーザーの中には、荷卸し地点や打設箇所において単位水量検査を試みているケースもみられる。しかし、単位水量の測定手法はこれまで多くの方法^{1), 2)}が標準化、提案されているが、操作性、迅速性、精度および経済性など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、単位水量をどこでも、より簡単に、迅速に推定するための試験方法の開発に取り組んでいる。フレッシュコンクリートから採取したモルタルの静電容量と質量を測定し、それらの結果から単位水量を推定する静電容量型水分計（以下、水分計と略）による新しい方法を提案し、単位水量検査の一手法として可能性があることを前報³⁾で述べた。しかし、実際のフレッシュコンクリートへの適用性およびその精度などについては、まだ実証されておらず課題として残されていた。

そこで本報では、前報で得られた結果に基づき、普通コンクリート、高流動コンクリートなどを対象とした水分計の適用実験を行い、その適用性を検討することとした。

2. 推定法の概要

2.1 水分計の概要

水分計の測定原理は、モルタル中の水分量はその静電容量にほぼ比例することを利用した方法で、簡単、迅速、非破壊的に測定されることを特徴としている。装置は、図-1に示したように静電容量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

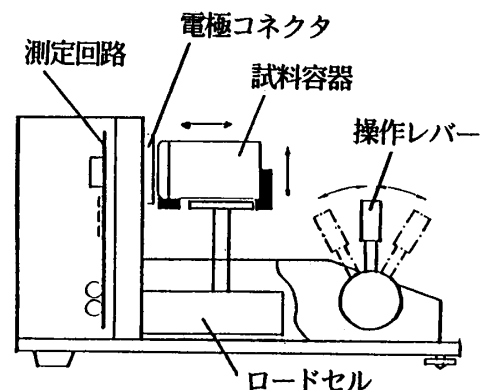


図-1 水分計の概略

*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

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静電容量は電子回路技術を利用して検出される。

水分計で検出する静電容量の変化は主に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とした⁴⁾。

$$M_o = \frac{m - m_o}{V} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 M_o ：水分率（％）

m ：試料の質量（kg）

m_o ：試料の絶乾質量（kg）

V ：試料の容積（ℓ）

2.2 モルタル水分率の推定式

前回の実験³⁾の結果から、水分計によるモルタル水分率推定式は次の 2つが得られた。

式（2）は静電容量法による推定式、式（3）は静電容量と単位容積質量の組み合わせ法による推定式である。

$$M = -15.63 + 5.29C - 0.11C^2 \quad (2)$$

$$M = -21.85 + 9.09 \left(\frac{C}{\rho^{1/2}} \right) - 0.32 \left(\frac{C}{\rho^{1/2}} \right)^2 \quad (3)$$

ここに、 M ：モルタルの推定水分率（％）

C ：モルタルの静電容量（pF）

ρ ：単位容積質量（kg/ℓ）

2.3 コンクリートの単位水量の推定方法

水分計により推定される水分量（水分率）はモルタル容積中に含まれる投入水量と細骨材の吸水量の合計水量であるから、練り上がりコンクリートの実測空気量と目標空気量との差を示方配合に示されている構成材料の構成比に基づいて再分配し、各材料の単位量を調整する必要がある（ここでは、調整配合と呼ぶことにする）。

実測空気量に調整した配合の推定単位水量は、

水分計の測定から得られた推定水分率と単位モルタル容積および細骨材の吸水量から、式（4）を用いて算出される。

$$We = V_m \times \frac{M}{100} - Q \quad (4)$$

ここに、 We ：調整配合における推定単位水量（kg/m³）

V_m ：調整配合における単位モルタル容積（ℓ/m³）

M ：モルタルの推定水分率（％）

Q ：調整配合における細骨材の単位吸水量（kg/m³）

3. 実験の概要

3.1 使用材料

セメントは、普通セメント、早強セメントおよび高流動コンクリートには低熱セメントを用いた。混和剤は、AE減水剤および高性能減水剤を用いた。使用骨材は表-1に示した。

表-1 使用骨材の品質

配合	細 骨 材			粗 骨 材		
	粗粒率	絶 乾 比 重	吸水量 (%)	粗粒率	絶 乾 比 重	吸水量 (%)
A	2.66	2.57	2.71	6.87	2.90	0.73
B	2.34	2.43	5.14	6.87	2.90	0.73
C	2.56	2.63	2.66	6.94	2.80	0.64
D	2.61	2.46	5.01	6.76	2.90	0.70
E	2.46	2.56	2.93	6.76	2.90	0.72
F	2.29	2.52	4.05	6.72	2.92	0.86
G	2.58	2.48	4.30	6.72	2.92	0.86
H	2.50	2.54	3.17	7.16	2.84	0.64
I	2.36	2.51	3.76	7.16	2.69	0.42
J	2.74	2.74	3.20	6.73	2.58	3.48
K	2.49	2.68	3.70	6.67	2.57	4.52
L	2.51	2.57	2.54	6.74	2.70	0.80

3.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合は、土木用コンクリートに用いられている配合および高流動コンクリー

トの配合を用いた。表-2に配合条件を示した。

表-2 配合条件

コンクリートの種類 (記号)	粗骨材の最大寸法 (mm)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	目標水セメント比 (%)
普通コンクリート (A~I)	25	10	5	50 55 60
早強コンクリート (J~K)	20	10	5	40 43 46
高流動コンクリート (L)	20	スランブ° フロー値 65±5	—	25

3.3 実験方法

コンクリートはJIS A 1138に準じて作製し、

空気量はJIS A 1128により測定した。

次に、コンクリートを5mmふるいでウェットスクリーニングし、モルタルを約2ℓ採取した。

水分計ではモルタルの質量と静電容量を測定し、結果は3個の平均値で表した。測定容器は約330mlで、モルタル質量で表すと、700g前後に相当する。

ウェットスクリーニングから静電容量測定までにかかる時間は、わずか10分程度であった。

4. 実験結果および考察

4.1 フレッシュコンクリートの特性

単位水量推定に必要な調整配合のデータおよびモルタル水分計の測定結果を表-3に示した。

実測空気量に調整した配合の単位水量は149

表-3 コンクリート実験の結果

配合	調整配合			水分計測定値		配合	調整配合			水分計測定値	
	V _m	Q	W'	ρ	C		V _m	Q	W'	ρ	C
A-50	604	21.1	149	2.13	10.9	F-60	620	30.7	171	2.10	12.4
A-55	608	21.8	149	2.13	11.0	G-50	620	31.2	167	2.14	12.4
A-55	606	21.9	149	2.15	10.8	G-55	623	32.2	167	2.11	12.3
A-60	609	22.6	149	2.13	10.8	G-55	622	32.3	167	2.12	12.3
B-50	610	35.2	163	2.06	12.7	G-60	623	33.6	168	2.11	12.3
B-55	614	36.3	162	2.07	12.4	H-50	605	24.0	155	2.14	11.4
B-55	611	36.6	163	2.07	12.4	H-55	609	24.7	154	2.14	11.1
B-60	614	37.8	163	2.04	12.4	H-55	607	24.9	155	2.15	11.0
C-50	613	20.8	159	2.17	11.7	H-60	608	25.8	155	2.14	11.2
C-55	614	21.7	160	2.17	11.6	I-50	612	28.0	160	2.15	11.9
C-55	615	21.6	159	2.16	11.5	I-55	613	29.1	160	2.14	12.0
C-60	615	22.5	160	2.16	11.4	I-55	613	29.1	160	2.15	11.8
D-50	619	36.8	162	2.07	12.3	I-60	615	30.1	160	2.14	11.7
D-55	621	38.2	162	2.10	12.5	J-43	603	19.8	177	2.14	12.4
D-55	622	38.1	162	2.11	12.3	J-46	604	19.8	177	2.15	12.4
D-60	626	39.2	161	2.06	12.2	K-40	604	21.3	178	2.10	12.8
E-50	607	22.1	160	2.12	11.2	K-43	603	22.3	179	2.16	12.6
E-55	612	22.7	159	2.13	11.4	K-46	606	23.1	178	2.14	12.5
E-55	612	22.7	158	2.13	11.4	L-25	687	17.0	186	2.32	11.9
E-60	618	23.3	157	2.10	11.2	L-25	688	16.9	185	2.34	12.0
F-50	613	28.7	170	2.14	12.6	L-25	688	16.9	185	2.30	11.8
F-55	616	29.8	170	2.11	12.5	L-25	687	17.0	186	2.29	11.7
F-55	617	29.7	169	2.13	12.6						

～186kg/m³と広範囲にわたっている。また、モルタルの単位容積質量は2.04～2.34 kg/ℓそして静電容量は10.8～12.8pFに分布した。

水分率と静電容量、単位容積質量の間には、モルタル実験の結果とほぼ一致する関係が確認され、今回の実験で用いた骨材のすべてが前回のモルタル実験とは異なっていること、さらに早強セメントおよび低熱セメントのデータが追加されていることを考慮すると、モルタル水分率推定式の信頼性はより高くなったといえる。

また、以上のことから判断すると、セメントや混和剤の種類ならびに配合条件などがモルタル水分率及ぼす影響は、無視できる程度と考えられる。

4.2 静電容量法による単位水量推定

フレッシュコンクリートから採取したモルタルの静電容量から推定した単位水量と実測空気量に調整した配合の単位水量との関係は図-2に示したとおりである。

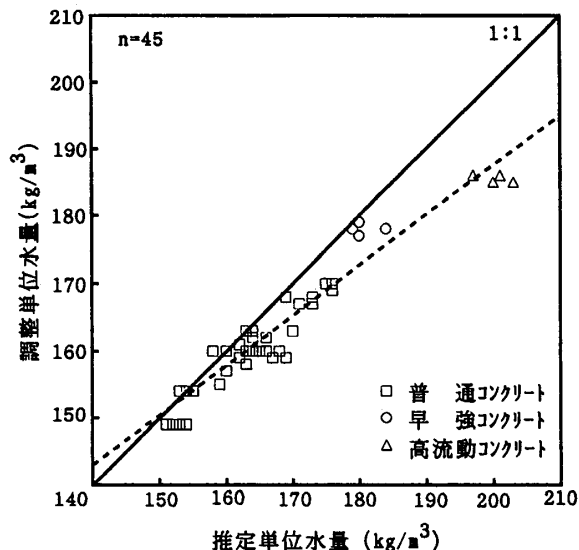


図-2 調整単位水量と推定単位水量の関係
(静電容量法)

図-2によると、調整単位水量が増加するに従い、推定単位水量は直線的に小さくなる傾向がみらる。調整単位水量と推定単位水量の相対誤差の平均値は 2.76%でその標準偏差値が2.2%

であるため、95%信頼限度の誤差は ±7.1%とモルタル実験の精度(±3.7%)の2倍程度に大きくなった。

静電容量は水分量の他にかさ密度の影響も受けると考えられるから、誤差が大きくなった要因には、モルタルの単位容積質量の変化が関わっているものと思われる。また、その他の誤差要因としては、ウェットスクリーニング時に網ふるいや容器などへの水分付着や空気量減少によるモルタル容積変化の影響があげられる。

しかしながら、調整単位水量と推定単位水量との間には明確な直線相関が認められ、その回帰式(単位水量補正式という)は式(5)のようになった。

$$W = 37.27 + 0.753W_e \quad (5)$$

ここに、 W : 補正単位水量 (kg/m³)

W_e : 推定単位水量 (kg/m³)

この補正式が単位容積質量やウェットスクリーニングなどの影響を補正するための式と考えることができるならば、モルタル水分率からフレッシュコンクリートの単位水量を容易に求めることができることになる。

この補正式から求めた補正単位水量と調整単位水量の関係は図-3のようになる。

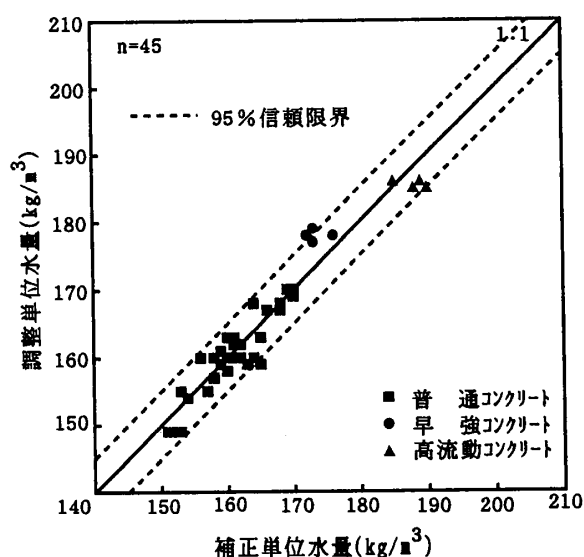


図-3 調整単位水量と補正単位水量の関係
(静電容量法)

回帰式の相関係数は0.96で、95%信頼限度での推定精度は $\pm 3.4\%$ になりモルタル実験と同等の精度になった。

4.3 組み合わせ法による単位水量推定

推定単位水量と実測空気量に調整した配合の単位水量の関係を図-4に示す。

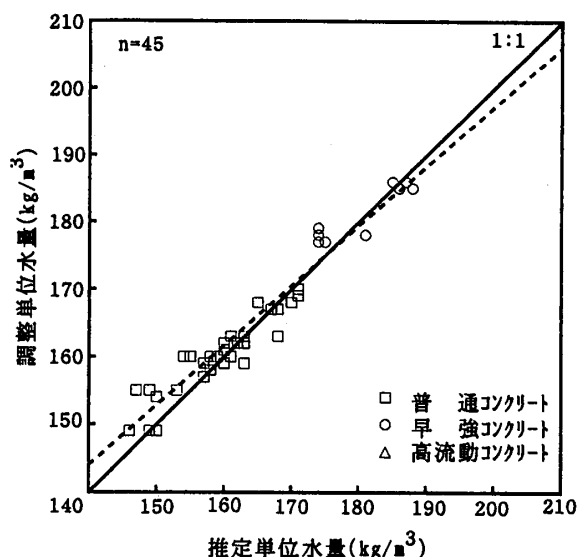


図-4 調整単位水量と推定単位水量の関係
(組み合わせ法)

静電容量法の場合と同様に、調整単位水量と推定単位水量との間に直線関係が成立している。静電容量法に比べて、推定単位水量は 1:1 の直線付近に分布し、精度の向上がみられた。

組み合わせ法から推定した場合の相対誤差の平均値は 0.54% で、標準偏差は 1.73% となり、信頼度95%の精度は $\pm 4.7\%$ であった。

4.2 の場合と同様に、調整単位水量と推定単位水量との相関を求めると、相関係数が0.97の回帰式、式(6)が得られた。

$$W = 19.18 + 0.888W_e \quad (6)$$

ここで、 W_e は組み合わせ法による推定単位水量 (kg/m^3) である。

この回帰式を単位水量補正式と仮定した場合、補正単位水量と調整単位水量の関係は図-5のようになり、95%信頼限度での推定精度は $\pm 2.9\%$ とモルタル実験の精度が再現された。

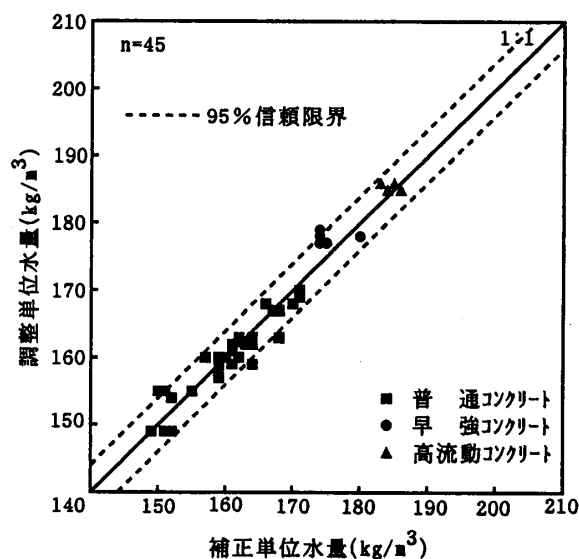


図-5 調整単位水量と補正単位水量の関係
(組み合わせ法)

4.4 誤差要因の検討

モルタル実験に比べて、推定誤差の標準偏差が大きくなった要因のひとつとしてフレッシュコンクリートからモルタルをウェットスクリーニングする際、網ふるいや容器などへの水分付着などによる水分損失や空気量損失によるモルタル容積変化が考えられる。

エアメータによる空気量測定値とモルタルの単位容積質量から計算した空気量を比較すると、コンクリート中から1~2%の空気量損失がみられ、単位水量を約1~3%多く評価したことになると思われる。しかし、静電容量法の結果をみると、推定単位水量は全般的に減少していることから、水分損失の影響が空気量損失をかなり上回っていたと推察される。組み合わせ法による補正式の切片の値が、森濱ほかの研究⁵⁾によるウェットスクリーニングモルタルの含水率減少量(単位水量にして、約 14kg/m^3)と類似していることから、この式はウェットスクリーニング影響の補正式と考えることができる。しかし、静電容量法の補正式は組み合わせ法とは大きく異なるので、今後、ウェットスクリーニングの影響を補正するための係数を実験によって

求めていく必要がある。

5. まとめ

本研究は、静電容量型水分計によるフレッシュコンクリートの単位水量推定方法を開発することを目的としたものである。限られた実験内容ではあるが、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) セメント、混和剤の種類や配合条件が単位水量を推定するためのモルタル水分率に及ぼす影響は小さい。

(2) モルタルの静電容量と質量（単位容積質量）の計測値から、 $\pm 2.9\%$ の精度でフレッシュコンクリートの単位水量を推定できた。開発の目標としていた推定精度 $\pm 3\%$ をクリアしたことになり、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ことが明らかになった。

(3) また、精度は若干落ちるが静電容量のみでも単位水量を $\pm 3.4\%$ の精度で推定できることが明らかになり、組み合わせ法とほぼ同等の精度といえる。質量計測のための秤を必要としないので、測定装置が簡略化できる。

(4) モルタル採取時のウェットスクリーニングの影響を補正していると推察される補正式の妥当性を検討するために、実験によって補正係数を求める必要がある。

(5) 生コンクリートにおける実験実績はまだ45件と少ないので、今後は現場においてさらに実績を積み重ね、単位水量補正式の精度検証や操作性の向上などをはかる必要がある。

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査・製造および施工指針（案）・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

(3) 斎 充ほか：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，PP.385-390，1997

(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

(5) 森濱、高橋：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，PP.159-164，1989