Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, 2003

# 論文　単位容積質量を用いた単位水量の迅速評価に関する研究

高橋 敏樹[*1]・近松 竜一[*2]・十河 茂幸[*3]

**要旨**：フレッシュコンクリートにおける単位水量の迅速評価方法として，単位容積質量と空気量を用いて単位水量を測定する方法（通称「エアメータ法」）を取り上げ，その測定方法の概要と現場荷卸し時における単位水量の測定事例について示した。測定原理にセメント吸水率の概念を適用し，測定誤差の検証では室内で製造したコンクリートの単位水量測定を行なった。現場測定では，複数の現場，配合に関して単位水量を測定した。その結果，本方法が現場での単位水量測定に充分な精度および迅速性を有していることが検証された。

**キーワード**：単位水量，単位容積質量，エアメータ法，現場測定

## 1.　はじめに

単位水量は，コンクリートのフレッシュ性状や，長期耐久性等の基本的特性を決定する重要な配合要因である。このため最近では，単位水量をコンクリートの耐久性能を評価するための代替指標として取り扱い，荷卸し時に検査する事例も増加している。単位水量の荷卸し時測定に関しては，測定結果が十分な精度を有することはもちろんであるが，実用上の観点からできるだけ簡便で迅速に評価できることが望ましい。

本論文では，単位容積質量と空気量を用いて単位水量を測定するエアメータ法[1)]の測定原理にセメント吸水率の概念を取り入れ，セメントの吸水によるコンクリートの容積変化の取扱いを整理した。また，本手法を用いた単位水量の試験室内測定および現場測定を行い，その適用性と測定精度に関して検証を行った。

## 2. 単位容積質量を用いた単位水量測定方法

### 2.1　測定方法の概要

材料の計量に誤差が生じるとそれに応じてフレッシュコンクリートの単位容積質量が変動する。エアメータ法は，この単位容積質量の設定値と実測値の差をもとに単位水量を求める方法である。ただし，単位容積質量は空気量によっても変化するので，単位容積質量の測定に併せて空気量を測定し，影響を補正する。

本測定方法の前提条件を以下に示す。

(1) 各使用材料の密度と計量値が既知である。
(2) 単位水量の変動は細骨材中の表面水の設定誤差に起因する。

単位水量の計画値に対応するコンクリートの単位容積質量を設定する上で，各使用材料の密度と計量値が必要となる。これら設定条件の変動は，単位水量の算定誤差に大きく影響する。単位水量の変動は，細骨材表面水率の設定誤差に起因するとしている。現状の計量設備は，計量器の器械誤差は小さく，所要の量を精度良く計量できる。むしろ計量時に生じる誤差の要因として，計量値の設定誤差，特に細骨材と一緒に計量される表面水の変動による影響が大きいと考えられる。湿潤状態の細骨材を計量する場合，細骨材中に含まれる表面水を考慮して水および細骨材の計量値を補正するが，実際の表面水率が補正設定値と異なる場合，計量された細骨材と水の量は計画配合と異なる。この場合，コンクリートの単位容積質量も計画配合と異なるため，実際の単位容積質量と，細骨材，水の密度差から，実際の細骨材と水の量を算出することができる。

*1　（株）大林組 技術研究所 土木構造・材料研究室 研究員 工修 （正会員）
*2　（株）大林組 技術研究所 土木構造・材料研究室 副主任研究員 工修 （正会員）
*3　（株）大林組 技術研究所 副所長 工博 （正会員）



NII-Electronic Library Service

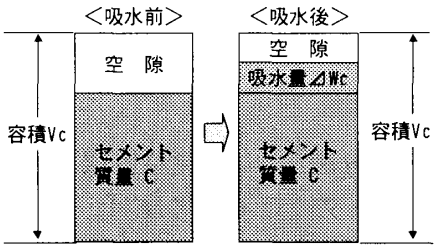


図-1　セメントの吸水に関する概念

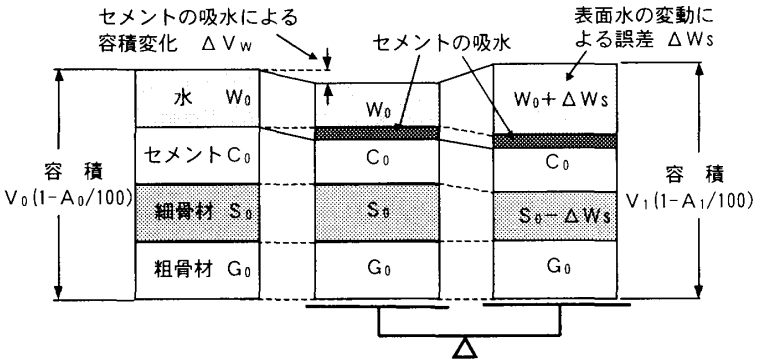


図-2　単位水量測定の原理

### 2.2　セメント吸水率の概念

各材料が正確に計量され，コンクリートの質量が設定どおりであると仮定すると，単位容積質量の設定値と実測値の違いはコンクリート容積の相違を意味している。前述したように，空気量による容積補正後の相違は，表面水率の設定誤差による水と細骨材の密度差に起因した容積の変動とみなされる。ところが，実際には練混ぜ時にセメントの吸水現象により容積が減少するため，この影響を考慮する必要がある。

JIS R 5201-1997「セメント密度試験」において，一定質量のセメントの容積を測定するのに溶媒として鉱油または水を用いた場合，後者の方が見かけ上容積が小さい結果となる。これは，両者の容積差に相当する量の水をセメントが吸水することを示している。そこで，溶媒として水を用いた試験値を湿潤密度と称し，通常の密度に代用し吸水による容積減少を補正している[2)]。

しかし，この湿潤密度の算定式では，吸水量をセメント質量の増加分ではなく容積の減少分として扱うため，厳密には本来の密度の定義とは異なり，誤解を招くおそれがある。そこで，このセメントの吸水の影響を表現するために，新たに「セメントの吸水率」の概念を提案する。単位水量の予測計算結果に関しては湿潤密度を用いた場合と同じであるが，セメント吸水率の概念を用いることにより実現象を正しく表現できる。セメントの吸水に関する概念を図－1に示す。吸水する前のセメント質量(C)に対する吸水された水の質量（$\Delta W_C$）の百分率（%）をセメントの吸水率（$\beta_c$）と定義すると，

$$\beta_c = (\Delta W_c / C) \times 100 \qquad (1)$$

JIS R 5201-1997における，セメントの密度（$\rho_c$），湿潤密度（$\rho_{cw}$）と，セメントの容積（$V_C$），水の密度（$\rho_w$）との関係と，式(1)より，セメントの吸水率（$\beta_c$）は，以下のように表せる。

$$\beta_c = \rho_w (1/\rho_c - 1/\rho_{cw}) \times 100 \qquad (2)$$

### 2.3　単位水量の算定手順

単位容積質量と空気量を用いた単位水量測定の原理を図-2に示す。この図をもとに，単位水量の算定手順を以下に示す。

(1) セメントの吸水による容積の変化量　$\Delta V_w$ ($m^3$)

$$\Delta V_w = C_0 \times (\beta_c / 100) / \rho_w \qquad (3)$$

ここで，

$C_0$：セメントの質量設定値　(kg)，

(2) セメントの吸水を考慮した単位容積質量の設定値　$\gamma_0$　($kg/m^3$)

$$\gamma_0 = (W_0 + C_0 + S_0 + G_0)/(V_0 - \Delta V_w) \qquad (4)$$

ここで，

$W_0$，$C_0$，$S_0$，$G_0$：水，セメント，細骨材，粗骨材の質量設定値　(kg)

$V_0$：コンクリートの設定容積　($m^3$)



NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

(3) コンクリートの実容積(実練混量) $V_1$ ($m^3$)

$$V_1 = \gamma_0 (V_0 - \Delta V_w) / \gamma_1 \quad (5)$$

ここで,

$\gamma_1$ : 単位容積質量の実測値 ($kg/m^3$)

(4) 表面水量の誤差 $\Delta W_s$ (kg)

$$\Delta W_s = \{V_1(1-A_1/100) - (V_0(1-A_0/100) - \Delta V_w)\}/(1/\rho_w - 1/\rho_s) \quad (6)$$

ここで,

$A_0$ : 空気量の設定値 (%)

$A_1$ : 空気量の実測値 (%)

$\rho_s$ : 細骨材の表乾密度 ($kg/m^3$)

(5) コンクリートの推定単位水量 W ($kg/m^3$)

$$W = (W_0 + \Delta W_s)/V_1 \quad (7)$$

なお, 空気量一定の条件において単位水量を比較するために, 式(7)から算定される単位水量の推定値を, 空気量の実測値($A_1$)から設定値($A_0$)とした場合に換算すると以下となる。

$$W_{A0} = W \times \{1 - A_0/100 \times (V_0 / (V_0 - \Delta V_w))\}/(1 - A_1/100) \quad (8)$$

### 2.4 測定誤差に関して

エアメータ法による単位水量の測定値は, はかりの秤量や空気量測定の精度の影響を受ける。計測機器の表示分解能として, エアメータの精度が0.1%, 最小秤量2gのはかりを用いた場合, 理論上は単位水量を±2～3$kg/m^3$の精度で測定することが可能である[1]。

また, 測定値の精度は, 使用材料の密度や材料の実際の計量値の増減に影響を受ける。骨材の密度が0.01$g/cm^3$変動するだけでも単位水量には約2$kg/m^3$の誤差が生じる。また, 骨材と同様に水の密度が変化した場合の影響も大きく, 練混ぜ水にスラッジ水を用いる場合, 特に濃度の管理に十分留意する必要がある。

各材料の計量誤差に関しては, いずれもJIS A 5308-1998に規定されている許容範囲内であれば単位水量の誤差として約±2$kg/m^3$程度に収まると試算される。仮に, 各材料がJISの許容範囲内で変動したとして誤差を累積すると約±5$kg/m^3$となり, これに各材料の密度変動(0.01$g/cm^3$) による影響を含めると最大で約±12$kg/m^3$の誤差を生じる可能性があると試算される。ただし, これは誤差要因が全て単位水量を一方向に偏向させる側に最大に偏った場合であり, 実際の測定時にはより小さい誤差範囲に収まると考えられる。

## 3. エアメータ法による単位水量測定事例

### 3.1 測定装置

エアメータ法によるフレッシュコンクリートの単位水量測定には, 写真-1のような高精度エアメータ, 台はかり, 演算ユニットからなる単位水量測定装置を用いた。高精度エアメータは, デジタル式圧力計を用いており, 空気量を理論上±0.05%の精度で測定できる。測定データは無線により演算ユニットに送られ, 単位水量の算定結果が表示される。

### 3.2 室内実験による単位水量測定の検証

前節で述べた種々の要因による測定誤差を調べるため, 安定した品質のコンクリートを連続して製造できる室内実験により単位水量測定を行った。表-1に示す配合の普通コンクリートおよび高流動コンクリートを繰返し製造し, バッチ毎に単位水量測定を行った。

フレッシュコンクリートの単位水量測定結果を図-3, 図-4に示す。コンクリートの推定単位水量の平均値は, 配合の種類によらずい

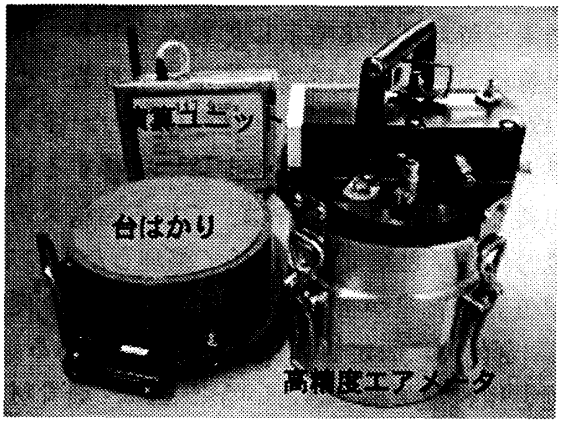


写真-1 単位水量測定装置



NII-Electronic Library Service

表-1 室内実験に用いたコンクリートの示方配合

| 種類 | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 目標スランプ (cm) | 目標空気量 (%) | 単位量 (kg/m³) 水 | セメント | 石灰石微粉末 | 細骨材 | 粗骨材 | AE減水剤 | 高性能AE減水剤 | 設定単位容積質量 (kg/m³) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 普通 | 55.0 | 43.0 | 12 | 4.5 | 187 | 340 | - | 747 | 1000 | 0.850 | - | 2279 |
| 高流動 | 33.0 | 47.0 | 65 | 4.5 | 175 | 530 | 50 | 726 | 836 | - | 5.51 | 2324 |

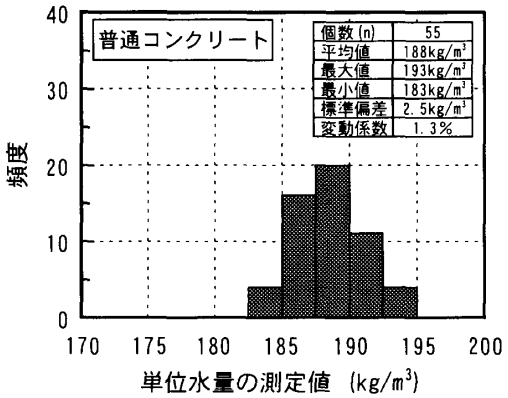


図-3 室内実験の単位水量測定結果（普通コン）

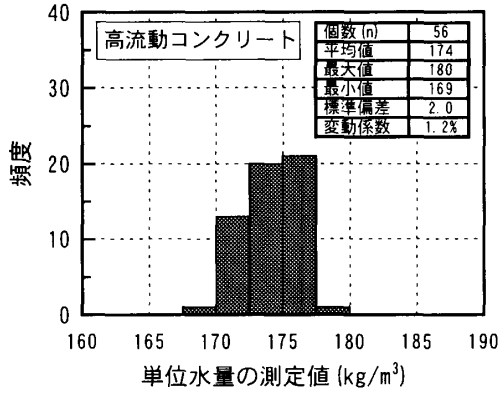


図-4 室内実験の単位水量測定結果（高流動）

ずれも計画値とほぼ一致する結果が得られている。一方，測定値のばらつきに関しては，概ね±5kg/m³の範囲に収束する結果となった。これらの測定値には，測定機器自体の器械誤差や試料採取時のサンプリングによる誤差が含まれているが，これらの影響を考慮したとしても，実用上は約±5kg/m³の範囲でフレッシュコンクリートの単位水量を測定できることを示すものと考えられる。

### 3.3 現場における単位水量測定の検証

現場荷卸し時にフレッシュコンクリートの単位容積質量と空気量を測り，単位水量を算定した事例を以下に紹介する。これらコンクリートの示方配合の一覧を表-2に示す。

図-5は，終日にわたりコンクリートを連続して打設した際の，荷卸し時の単位水量測定結果を時系列推移で示したものである。単位水量は，打設開始時には設定値より若干小さいが，徐々に増加し最大で約15 kg/m³多い結果となり，その後再び設定値に推移する結果が得られている。図-6は，これらの結果を単位容積質量と空気量の関係で整理したもので，単位容積質量が空気量以外の要因により変動し，全体的に設定値より小さい範囲にある。単位容積質量が小さいということは，細骨材よりも密度の小さい水が多く含まれていることを表し，推定単位水量が設定値よりも大きい結果となっている。

図-7は荷卸し時にエアメータ法および静電容量法を用いて単位水量を測定した結果を示したものである。測定値のばらつきは約10kg/m³程度で時系列による変動も比較的小さいが，測定値の平均は設定より約15kg/m³大きくなっている。静電容量法[3]による測定結果も同様に設定値から外れており，計画時と実際の配合が相違している可能性が高い。一方，図-8は高流動コンクリート配合の単位水量を測定した結果である。測定方法により結果には多少ばらつきがあるが，単位水量は示方配合上の設定から最大でも＋約10kg/m³以内の範囲で製造されているものと判断できる。

同一配合のコンクリートを複数のプラントから年間を通じて定期的に製造した場合の単位水量測定結果を図-9に示す。また，それらのうち，あるプラントにおける測定結果の一例を図-10に示す。単位水量の平均値は，プラント毎に若干の偏りはあるものの，計画値とほぼ一致している。また，そのばらつきは概ね±15kg/m³であるが，±10kg/m³以内に収まっているプラントもあり，実用上の測定精度を考慮すると，全般的にはほぼ適正に単位水量が管理されているものと判断される。



NII-Electronic Library Service

表-2 現場測定を行なったコンクリートの示方配合

| 配合 | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 目標スランプ (cm) | 目標空気量 (%) | 単位量 (kg/m³) 水 | セメント | 石灰石微粉末 | 細骨材 | 粗骨材 | AE減水剤 | 高性能AE減水剤 | 設定単位容積質量 (kg/m³) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 48.5 | 42.5 | 8 | 4.5 | 155 | 320 | - | 761 | 1070 | 0.800 | - | 2310 |
| B-1 | 51.5 | 41.0 | 12 | 4.5 | 166 | 323 | - | 742 | 1091 | 0.808 | - | 2326 |
| B-2 | 42.0 | 49.0 | 45 | 3.0 | 175 | 417 | - | 844 | 908 | - | 6.255 | 2350 |
| C | 32.0 | 50.0 | 65 | 4.5 | 170 | 530 | 50 | 771 | 798 | - | 5.51 | 2326 |
| D | 45.0 | 43.8 | 18 | 4.5 | 172 | 382 | - | 742 | 980 | - | 3.82 | 2276 |
| E | 60.8 | 37.7 | 8 | 4.5 | 158 | 260 | - | 709 | 1171 | 2.87 | - | 2298 |

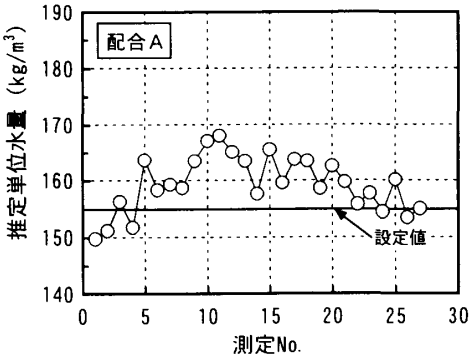


図-5 配合Aの単位水量測定結果

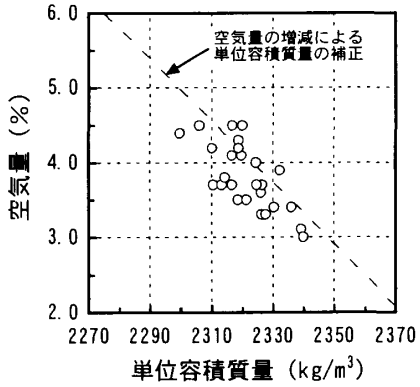


図-6 配合Aの単位容積質量と空気量の関係

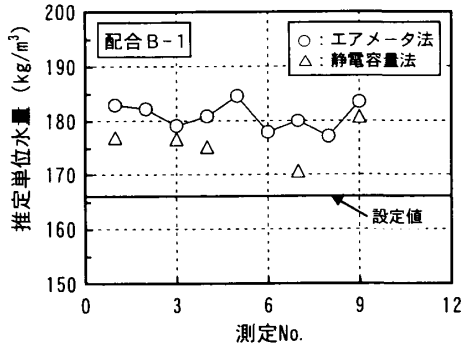


図-7 配合B-1の単位水量測定結果

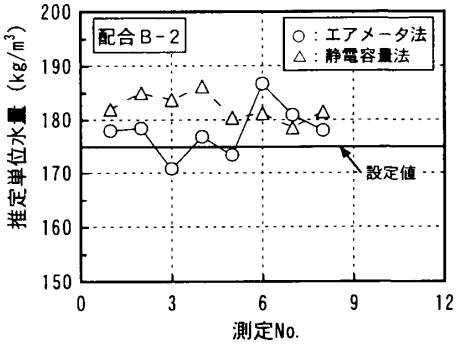


図-8 配合B-2の単位水量測定結果

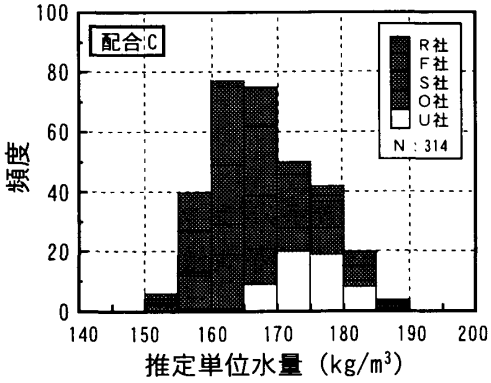


図-9 配合Cのプラント別単位水量測定結果

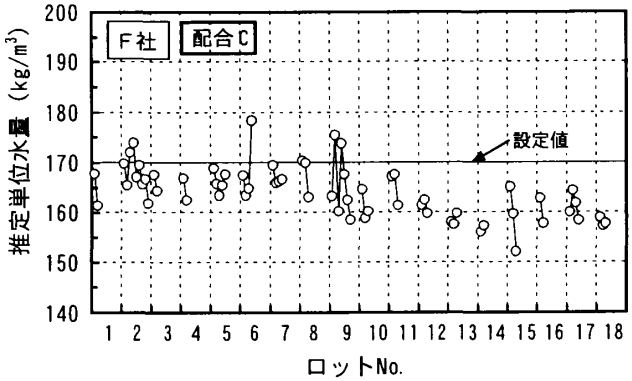


図-10 配合Cの特定プラントの単位水量測定結果

図-11は普通コンクリートの1日の打設に関して，全アジテータ車のコンクリートをそれぞれ3台の単位水量測定装置で単位水量を測定した結果である。測定装置間の誤差は約5kg/m³に収まり，単位水量測定値も設定値±5kg/m³の範囲に概ね収まっている。受入れ検査に単位水量測定を用いることを想定し，設定値±10kg/m³を品質管理の限界値としていたが，この測定時には限界値を超えるコンクリートは供給されなかった。

図-12は，現場プラント製造の普通コンクリートの全アジテータ車に関して単位水量測



NII-Electronic Library Service

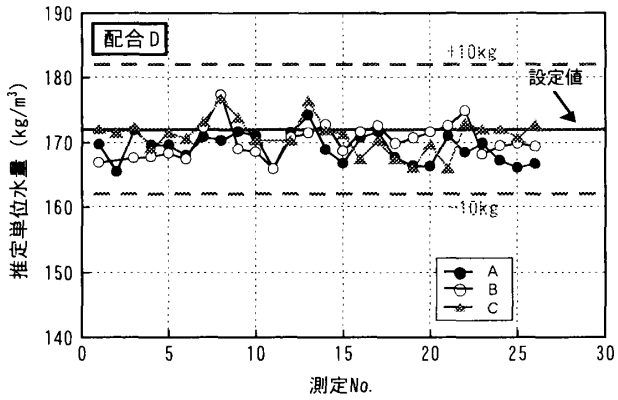


図-11 配合Dの単位水量測定結果

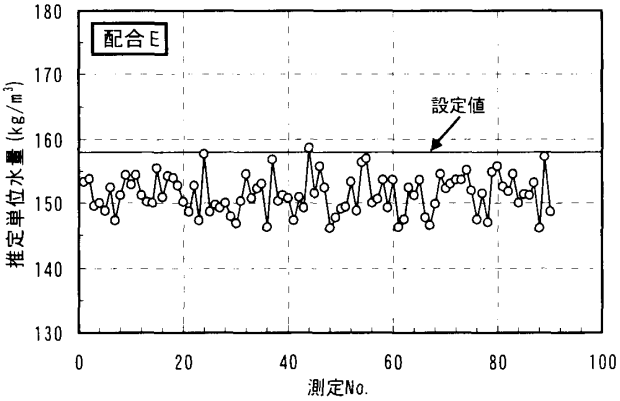


図-12 配合Eの単位水量測定結果

定を行った結果である。平均値は151kg/m³と設定値に比べ-7kg/m³となっているが，ばらつきに関しては，平均値から概ね±7kg/m³の範囲となっている。本測定では，スランプ試験も同時に行ったが，平均値9.6cm，ばらつきが±1.5cmと1日を通して性状が非常に安定しており，単位水量が安定していたために，スランプの安定した良質なコンクリートが連続的に製造されていたと考察できる。

しかし，設定値からの変動で見ると，大きいところでは-15kg/m³となっており，単位水量測定値自体は設定値と離れている。コンクリートの品質は非常に良好であったため，このような場合，外気温などに影響を受ける単位水量とスランプ等の性状の関係を把握して，単位水量の管理基準値を決定することが重要になる。単位水量が減少する場合，スランプや空気量が基準値内であれば品質的な問題は少ないと考えられるが，計画書に記述されているコンクリートとは異なるコンクリートが使用されていることになり，極端な場合は基準を設ける必要があると考えられる。あるいは，性能照査の観点から考えれば，計画配合がなくなり，強度や耐久性等の性能が確保されれば，単位水量は上限値の設定のみでよいという計画も考えられる。

単位容積質量と空気量を用いた単位水量の測定方法は，装置の取扱いが容易で，従来の空気量試験の延長上で測定することができる。測定時間に関しても，1測定が約5分と迅速に結果が求められるため，1時間に1回程度の測定であれば担当者一人での測定，管理が可能である。このようにエアメータ法は，プラント製造時の単位水量管理としては勿論のこと，現場での荷卸し検査にも適用可能な実用的な単位水量評価方法であるといえる。

## 4. まとめ

本論文より得られた知見を以下に示す。

(1) セメント吸水率の概念を用いることにより，セメントの吸水による容積変化を考慮した単位水量算定式を正確に表現できる。

(2) 単位容積質量と空気量から単位水量を算定する方法では，測定装置の器械誤差や試料のサンプリング誤差を考慮しても，実用上約±5kg/m³の精度で単位水量を測定できる。

(3) 本測定方法は，空気量試験との併用が可能で，簡便かつ迅速に結果が得られることから，単位水量の管理または検査のための実用的な評価方法として十分に活用できる。

## 参考文献

1) 中村博之，十河茂幸：フレッシュコンクリートの空気量と単位容積質量の測定結果による配合推定方法の適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23, No.2, pp.325-330, 2001.

2) 河野広隆，片平 博：フレッシュコンクリートの単位水量迅速測定法に関する実験的研究土木研究所資料，第3657号，1999.

3) 斎 充ほか：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，コンクリート年次論文報告集，Vol.20, No.2, pp.307-312, 1998.



NII-Electronic Library Service