

フレッシュコンクリートの単位水量試験に関する検討

並木 哲・早川 光敬・久保田 浩

Keywords: water content, testing method, fresh concrete, quality control, error

単位水量，試験方法，フレッシュ性，品質管理，誤差

1. はじめに

近年共同住宅の高層化が進み，それに伴い高強度材料の使用も増えてきている．

高強度材料の適用は，高層化を可能にするばかりでなく，大スパン化や部材断面の減少による建物の軽量化・有効面積の拡大などの効果も期待でき，設計基準強度100N/mm²（以下Fc100と略す）の高強度コンクリートが実用化されている¹⁾．

このような高強度コンクリートでは今まで以上に品質管理が重要になる．また，単位水量を管理することで，品質が安定し強度の変動が小さくなることが確認されている²⁾．

単位水量測定方法として水中質量法は，精度よく測定できることから，高強度コンクリートの品質管理に用いている．しかし，水中質量法はある程度の熟練した測定員が測定を行う必要が有る．そこで，測定員の熟練度が比較的不要と思われる高周波電子レンジ法と静電容量法の精度を確認し，品質管理への適用性を検討した．

2. 検討方法

ここでは，水中質量法と高周波加熱乾燥法（電子レンジ法と略す）および静電容量法による単位水量測定方法を取り上げ，試験方法の比較を行った．

まず実機試験として，生コン工場から出荷するFc100およびFc80のコンクリートについて，単位水量の変動を調査し，単位水量試験方法の比較を行った．

次に，室内試験により単位水量試験方法の測定誤差の要因について検討を行った．また，実機試験の結果から，調合強度算定時の強度の変動係数についての検討を行った．

2.1 水中質量法

コンクリートの水中質量と空中質量の差から単位水量を推定する．試験手順を以下に示す．

- 1) コンクリート試料約2kgを採取する．
- 2) コンクリートの空中質量を測定する．
- 3) 水中にてコンクリート中の空気を追い出し，水中質量を測定する．
- 4) 粗骨材を洗い出し，粗骨材量を測定する．
- 5) 空中質量と水中質量の差と，各材料の密度から単位水量を推定する．

Conv：コンクリート試料体積（cm³）

$$Conv = \frac{Cons - Conw}{\rho_w} \dots\dots\dots(1)$$

$$Conv = \frac{Cs}{\rho_c} + \frac{Ss}{\rho_s} + \frac{Gs}{\rho_G} + \frac{Ws}{\rho_w} \dots\dots\dots(2)$$

Cons：コンクリート試料空中質量（g）

Conw：コンクリート試料水中質量（g）

ρ_w ：水温に対応する水の密度（g/cm³）

Cs：試料中のセメント量（g）

Ss：試料中の細骨材量（g）

Gs：試料中の粗骨材量（g）

Ws：試料中の水量（g）

ρ_c ， ρ_s ， ρ_G ：セメント，細骨材，粗骨材の密度（g/cm³）

2.2 高周波加熱乾燥法（電子レンジ法）

コンクリートを5mmのふるいでウェットスクリーニングしてモルタルを抽出し，高周波加熱器（電子レンジ）により加熱乾燥を行い，単位水量を推定する．加熱乾燥には業務用電子レンジ（電圧200V，出力1600W）を用いて測定を行った．加熱時間は試料の最高温度が200℃以下³⁾となるように設定した．試験手順を以下に示す．

- 1) コンクリートを5mmふるいに載せ，パイプレータをかけながら，ウェットスクリーニングを行う．

- 2) 試料容器（紙皿）を電子レンジで10秒間加熱乾燥し、容器質量を測定する。
- 3) ウェットスクリーニングしたモルタルを試料容器に約400 g 採取して、試料質量を測定する。
- 4) 試料を電子レンジで3分30秒間加熱する。
- 5) 乾燥後の試料質量を測定する。
- 6) 次式により、単位水量測定値を計算する。

$$W = \frac{Wb - Wa}{Wb - Wc} \times (W + C + S) - \frac{P}{100 + P} \times S + Ad \times \frac{m}{100} \dots\dots(3)$$

W：単位水量測定値（kg/m³）
 Wa：容器質量（g）
 Wb：乾燥前モルタル質量＋容器質量（g）
 Wc：乾燥後モルタル質量＋容器質量（g）
 W：計画単位水量（kg/m³）
 C：計画単位セメント量（kg/m³）
 S：計画単位細骨材量（kg/m³）
 P：細骨材吸水率（％）
 Ad：計画単位混和剤量（kg/m³）
 m：混和剤固形分量（％）

2.3 静電容量法

モルタルの水分量と静電容量は高い相関関係があることから、静電容量を測定することで、単位水量を推定する。測定には生コン水分計（ケット科学研究所製 HI-330）を用いて測定を行った。試験手順を以下に示す。

- 1) ウェットスクリーニングしたモルタルを試料容器に採取して、突き棒でモルタル中の気泡を取り除いた後、試料の表面を平らにする。
- 2) モルタル質量を測定する。
- 3) 調合、材料の表乾密度および吸水率、モルタル質量、空気量を入力した後、生コン水分計で単位水量の測定を行う。3回測定を行い、平均値を求める。

3. 生コン工場での比較試験

比較試験に用いたコンクリートは、川崎市に建設中のRC高層マンションS新築工事に打設されるFc100およびFc80の高強度コンクリートである。使用材料および調



写真-1 試験装置（水中質量法）
Measuring apparent mass in water



写真-2 試験装置（電子レンジ法）
Microwave type



写真-3 試験装置（静電容量法）
Capacitance type

表-1 使用材料
Combination of materials

結合材	VKC100SF（第一セメント、密度2.98、普通ポルトランドセメント：スラグ石膏系結合材：シリカフェム＝7：2：1）
細骨材	君津産山砂（密度2.61）
粗骨材	大月産砕石（安山岩）（密度2.65、実績率60％）
混和剤	高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）

表-2 調合
Mix proportion

Fc (N/mm²)	W / B (％)	単位量 (kg/m³)				
		水	結合材	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤
100	22.5	155	689	692	871	18.6
80	29.5	155	526	835	871	11.6

合を表1,2に示す。試験は、Fc100は延べ5日、Fc80は6日間について、出荷する全ての生コン車からコンクリートをサンプリングして、単位水量を測定した。

単位水量の測定結果を図-1,2に、各試験方法の測定結果の関係を図-3,4に示す。

図-1,2の日内の測定値の変動傾向を見ると、各測定結果は、調合に関係なく測定日によってほぼ同じ場合と、ずれが生じる場合があることが分かった。

図-3,4の結果から、電子レンジ法と静電容量法の単位水量の推定結果は水中質量法と比較して、Fc100の調合では少なめであるが、Fc80の調合では多めに推定していることが分かった。

加熱乾燥法／水中質量法の平均値は、Fc100では1.00となり、Fc80では1.04である。静電容量法／水中質量は、Fc100が0.98、Fc80が1.04となる。これらの単位水量測定結果のずれは、測定方法そのものの誤差と、ウェットスクリーニングによる誤差が含まれていると考えられる。ウェットスクリーニングによる誤差の原因としては、調合の違いによるモルタルの粘性の差から、粗骨材に付着して残るモルタルと、落下するモルタルとで水分に差があると考えられる。

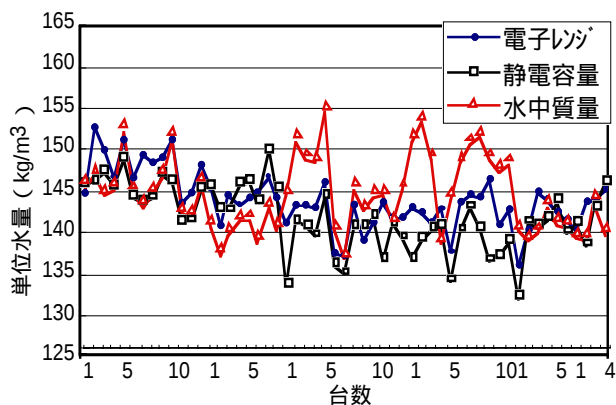


図-1 単位水量測定結果 (Fc100)
Test results of water content (Fc100)

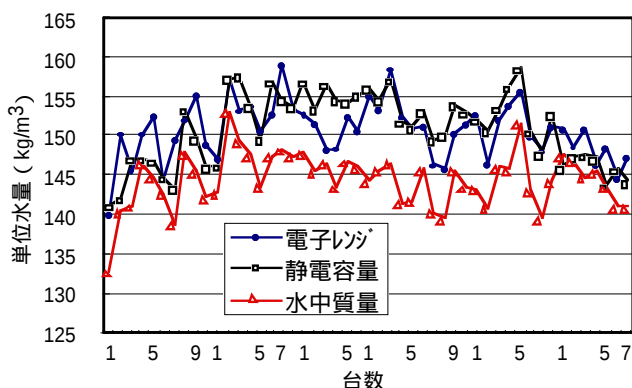


図-2 単位水量測定結果 (Fc80)
Test results of water content (Fc80)

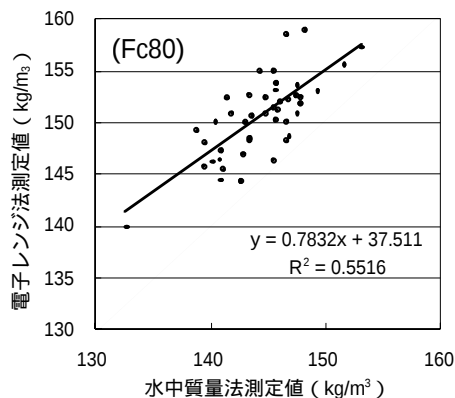
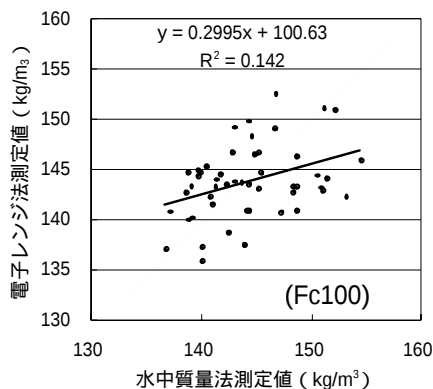


図-3 水中質量法と電子レンジ法の関係
Relationship between measuring apparent mass in water and microwave type

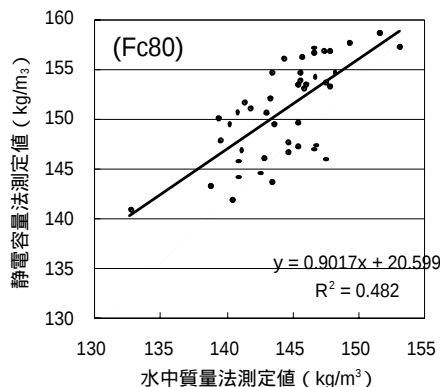
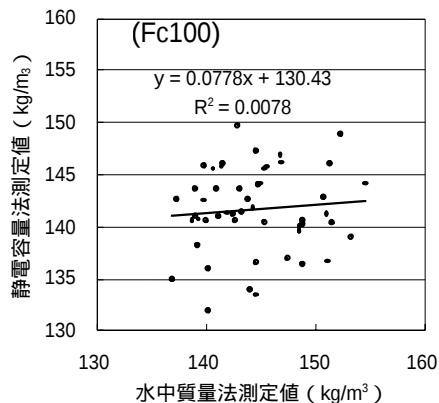


図-4 水中質量法と静電容量法の関係
Relationship between measuring apparent mass and in water and capacitance

4. 室内試験

4.1 目的

練り混ぜたモルタルおよび、コンクリートからウェットスクリーニングにより取り出したモルタルを用いて電子レンジ法で単位水量試験を実施して、試験方法固有の誤差とウェットスクリーニングによる誤差の検討を行うとともに、補正方法の検討を行った。

4.2 使用材料および調合

使用した細骨材および粗骨材は、生コン工場での比較試験で使用したものと同一とし、モルタルの調合を表-3に、コンクリートの調合を表-4に示す。ただし、ウェットスクリーニングは5mmのふるいを用いて行うことから、骨材粒度分布の影響を排除するために、細骨材の5mm上と、粗骨材の5mm下を取り除いて使用した。

4.3 試験方法

4.3.1 モルタル試験

練混ぜはモルタルミキサを使用し、練り量は3リットルとした。練り上がり後直ちに、電子レンジ法および静電容量法を用いて単位水量測定を行った。

4.3.2 コンクリート試験

練混ぜは強制練りミキサを使用し、モルタル先練り後、粗骨材を投入した。練り量は20リットルとした。

練上がり後、ウェットスクリーニングを行い、取り出したモルタルについて、電子レンジ法および静電容量法で単位水量測定を行った。

4.4 測定結果

4.4.1 モルタル試験結果

試験結果を図-5,6に示す。

図-5より、電子レンジ法は実施調合と比較すると、水量はほぼ一致しているが、水セメント比が高い調合では水量を少なく推定し、水セメント比が低い調合では水量を多く推定している傾向が若干認められた。しかし、実施調合との差は最大でも2 kg/m³程度であり、図-6からも傾きはほぼ1であることから、試験法固有の誤差は小さいと考えられる。

図-5より、静電容量法は実施調合と比較すると、水セメント比が高い調合では水量を多く推定し、水セメント比が低い調合では水量を少なく推定していることが分かった。また、図-6からもセメント水比の影響を受けていることが分かる。モルタルを練り混ぜて行った本試験にはウェットスクリーニングの誤差が含まれないことから、これは、試験法固有の誤差である。

4.4.2 コンクリート試験

試験結果を図-7,8に示す。

表-3 調合（モルタル）
Mix proportion (mortar)

No.	W / B (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)		
			水	結合材	細骨材
1	20.0	2.0	231	1157	932
2	22.5		231	1028	104
3	26.0		231	890	1162
4	29.5		231	784	1253

表-4 調合（コンクリート）
Mix proportion (concrete)

No.	Fc (N/mm ²)	W / B (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
				水	結合材	細骨材	粗骨材
1	110	20.0	2.0	155	775	624	868
2	100	22.5		155	689	698	868
3	90	26.0		155	596	778	868
4	80	29.5		155	525	839	868

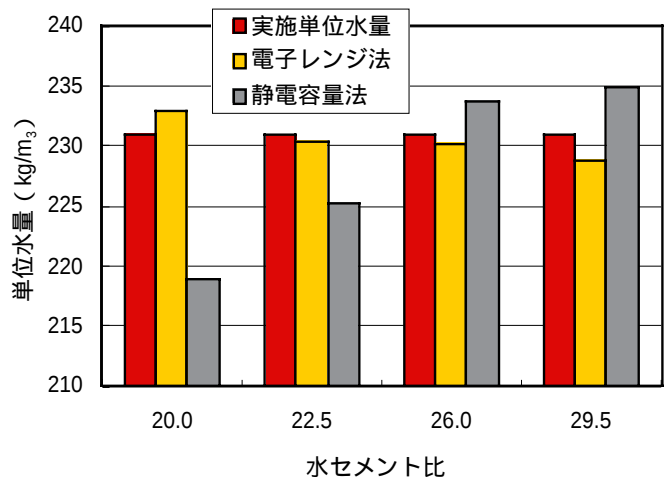


図-5 単位水量測定結果（モルタル）
Test results of water content (mortar)

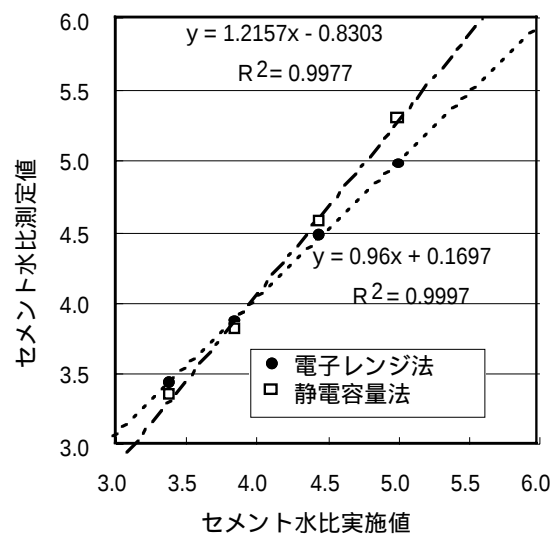


図-6 セメント水比の推定結果（モルタル）
Test results of water cement ratio (mortar)

図-7より、電子レンジ法は実施割合と比較すると、水セメント比が高い割合では水量を少なく推定し、水セメント比が低い割合では水量を多く推定していることが分かった。図-8からもセメント水比の影響を受けていることが分かる。モルタル試験の結果から、試験法固有の誤差が小さいと考えられることから、本試験での差がウェットスクリーニングによる誤差と考えられる。

図-7より、静電容量法は実施割合と比較すると、水量はほぼ一致しているが、やや少なく推定する傾向が認められた。モルタルでの実験と比較すると逆の傾向が認められた。これは本装置には実験式で補正するプログラムが組み込まれており、高強度コンクリートで試験固有の誤差やウェットスクリーニングの誤差の補正を考慮したプログラムを用いて測定しているため、水セメントの大きい割合で誤差が大きくなった可能性がある。

5. 誤差の検討結果

コンクリートの測定結果から、各試験法の誤差を検討し95%信頼限界 (1.96σ) として求めた。また、図-8に示すような関係式を求めて、測定結果を補正して単位水量を推定した場合の誤差を求めて表-5に示した。

この結果、電子レンジ法の95%信頼限界 (1.96σ) での誤差は、補正無しで $\pm 9.8 \text{ kg/m}^3$ であり、補正を行えば誤差は $\pm 4.2 \text{ kg/m}^3$ となった。したがって、水セメント比による補正を行うことにより、推定値は実施単位水量に近くなり、精度が向上することが分かった。

静電容量法の精度は、補正なしで $\pm 5.4 \text{ kg/m}^3$ で、補正を行えば $\pm 3.2 \text{ kg/m}^3$ となった。

既に実績のある、水中質量法の誤差は、 $\pm 2.4 \text{ kg/m}^3$ であることが分かっている⁴⁾。したがって、電子レンジ法と静電容量法は水中質量法と比較すると精度はやや劣るものの、予め補正式を求めることで、今回試験をおこなった。高強度コンクリートの範囲では、単位水量の管理に適用できる可能性を確認できた。

6. 単位水量の管理結果

「3.生コン工場での比較試験」において単位水量の測定と同時に、全ての生コン車から $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の試験体を採取し、標準養生材齢56日で圧縮試験を行った。S新築工事では、水中質量法による単位水量推定結果を次のバッチの計量値に反映して、単位水量の安定化を図っている。

単位水量の測定結果を図-9に、圧縮強度の測定結果を

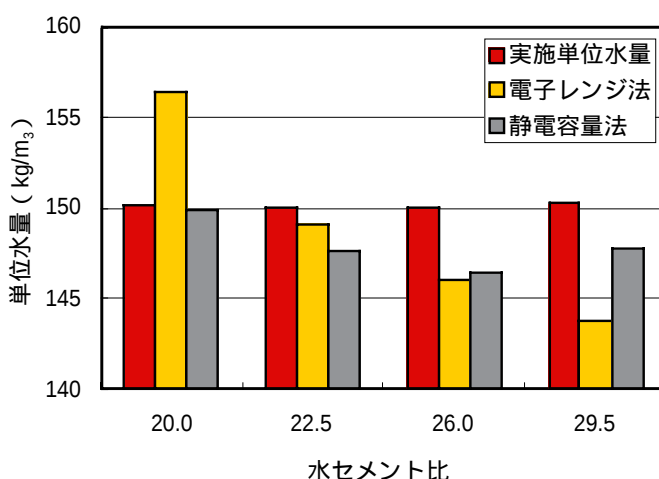


図-7 単位水量測定結果 (コンクリート)
Test results of water content (concrete)

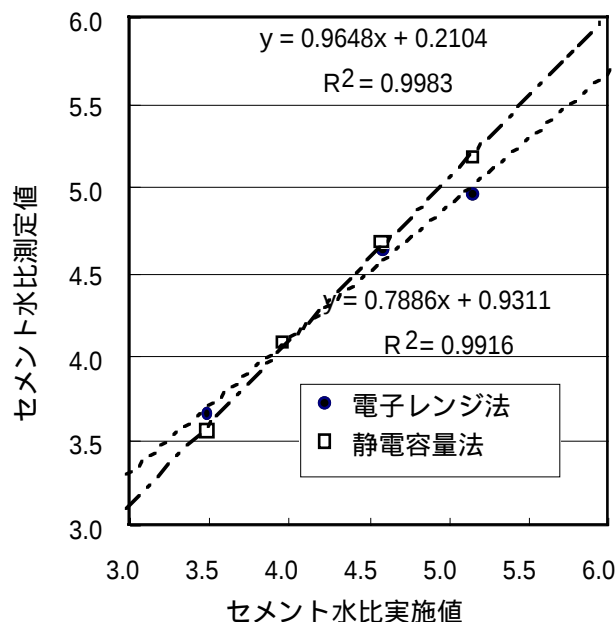


図-8 セメント水比の推定結果 (コンクリート)
Test results of water cement ratio (concrete)

表-5 単位水量測定の誤差
Error factors

測定方法	95%信頼限界(kg/m³)	
	補正無し	補正あり
加熱乾燥法	± 9.8	± 4.2
静電容量法	± 5.4	± 3.2
水中質量法	-	± 2.4

図-10に示し、各々平均値と95%信頼限界を示した。また、表-6に各平均値と標準偏差を示す。

表-6より、単位水量の変動が少なく圧縮強度の変動係数も非常に小さいことが分かった。圧縮強度の変動係数

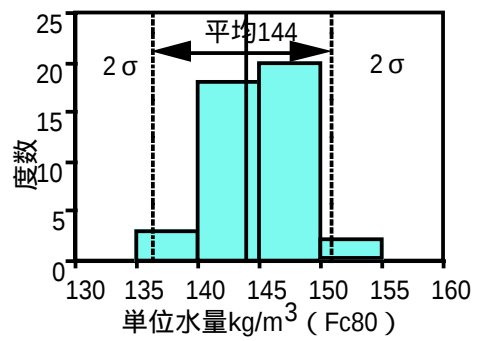
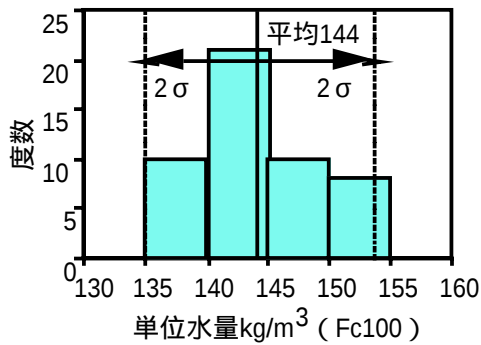


図-9 単位水量測定値のヒストグラム

Frequency distribution of estimate value of water content

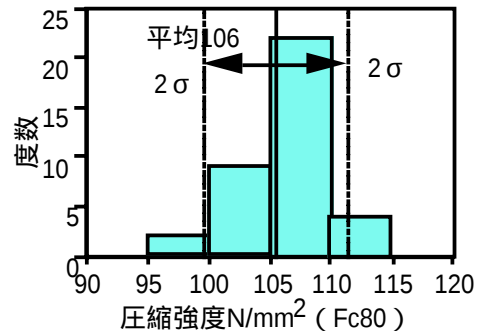
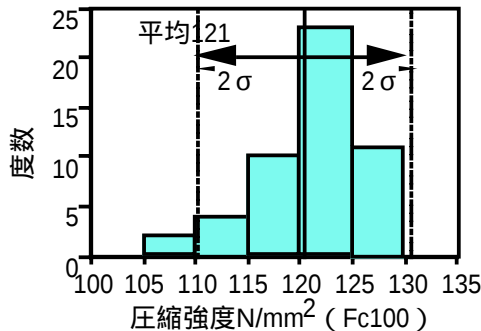


図-10 単位水量測定値のヒストグラム

Frequency distribution of estimate value of strenght

表-6 単位水量と圧縮強度の測定結果

Test results of water contrnt and strenght

Fc	単位水量 (kg/m³)			圧縮強度 (N/mm²)			
	計画調査	実測平均	σ	調査 (合格判定)	平均	標準偏差 σ	変動係数 (%)
100	155	144.4	4.5	110 (105.3)	121	5.2	4.3
80	155	144.4	3.6	88 (84.2)	106	3.1	2.9

は、Fc100が4.3%でFc80が2.9%となった。このように、単位水量を測定すると圧縮強度の変動が少なくなることから、調査設定算定時の変動係数は通常は10%として計算するところを、単位水量管理を条件に5%と低減している。今回の調査結果は、これを十分に満足していることが分かる。

6. まとめ

受入検査としての3種類の単位水量試験について、その精度と実工事での管理の適用性について検討を行った結果、以下の事が明らかとなった。

- 1) 実機試験の結果、電子レンジ法と静電容量法では、調査により単位水量測定結果に差がある。この差は、ウェットスクリーニングの影響が大きい。
- 2) 水中質量法以外にも、電子レンジ法と静電容量法も品質管理に用いることができる。ただし、予め試験練

りを実施し、W / Cを3点程度変化させたコンクリートについて、単位水量試験を行い、補正値を求める必要がある。

- 3) 単位水量管理を行うことで、調査時に強度の変動係数を低減可能であることが確認できた。

参考文献

- 1) 並木哲・沢井布兆・黒羽健嗣・原孝文：Fc1000kgf/cm²の高強度コンクリートを用いた超高層建築物の施工，コンクリート工学，Vol.37,No.3,pp.35～38,1999.3
- 2) 並木哲：CFT構造および高層RC造における品質管理の現状，コンクリート工学，Vol.39,No.5,pp.52～55,2001.5
- 3) 橋本真幸・猪熊洋典・伊興田直行：高周波電子レンジ法によるフレッシュコンクリートの簡易単位水量推定試験に関する研究，第11回生コン技術大会研究発表論文集，pp69～74，2001
- 4) 丸嶋紀夫，黒羽健嗣，並木哲，久保田浩：水中質量法によるフレッシュコンクリートの単位水量試験方法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20,No.2,pp.313～318,1998