

論文 単位水量の迅速推定における試料のサンプリングの誤差及び偏りに ついて

辻本 一志^{*1}・棟方 功^{*2}・伊藤 康司^{*1}・鈴木 一雄^{*3}

要旨：単位水量迅速推定の各作業工程における推定値の変動や偏りについて検討を行った。すなわち、サンプリングによって生じる試料の品質変動、ウェットスクリーニングによって生じるモルタルの構成材量の変化及び測定作業等が単位水量の推定値に及ぼす影響の大きさを高周波加熱法により具体的に求めた。実験の結果、高周波加熱法における推定値の変動は全体として $\pm 5.5\text{kg/m}^3$ 程度であり、その85%程度がサンプリングに起因するものであることが分かった。また、推定値の偏りは、コンクリートをウェットスクリーニングすることによって生じ、本実験における偏りの大きさは $-15\sim-20\text{kg/m}^3$ 程度であった。

キーワード：コンクリート、単位水量、迅速推定方法、高周波加熱法、サンプリング

1. はじめに

近年生コンクリート工場で行う工程検査や建設現場における製品検査でコンクリートの単位水量を試験するケースが増えつつある。現在比較的多く行われている単位水量の試験方法としては、高周波加熱法、静電容量法、減圧加熱乾燥法、エアメータ法等が挙げられる。これらのうち、高周波加熱法、静電容量法及び減圧加熱乾燥法は、コンクリートをウェットスクリーニングして採取したモルタルを試料として用いる。このウェットスクリーニングモルタルを用いる方法の利点は、試料中に含まれる粗骨材量の変動の影響を受けないことや試験器具が比較的小さく取り扱いが容易であること、また加熱乾燥法については乾燥所要時間が短いこと等があげられるが、その反面、**図-1**に示すように、試料の準備に係わる工程数が多くなることやウェットスクリーニングの前後でモルタルを構成する材料の割合が変化するため推定値に偏りを生ずること等の問題点がある。

本研究は、ウェットスクリーニングモルタルを用いて単位水量を測定する試験方法のうち、最も実績のある高周波加熱法を取り上げ、各作業工程において生じる推定値の変動(ここでは、繰り返し測定における推定値の標準偏差を意味す

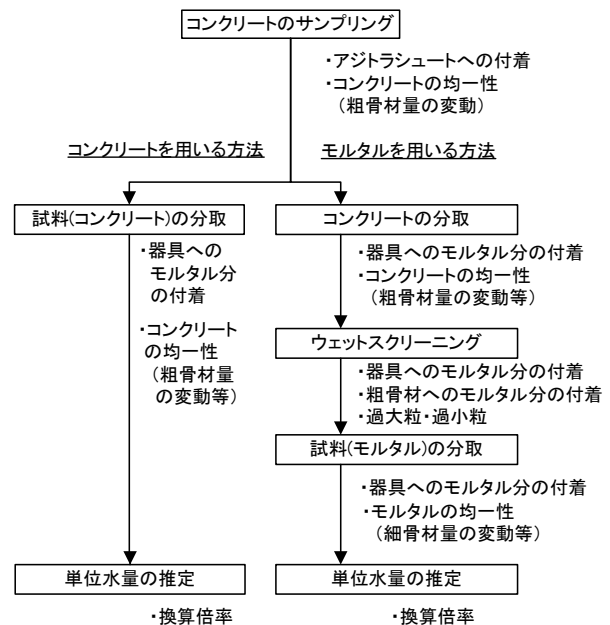


図-1 単位水量迅速測定の実業工程及び誤差要因

る)や偏り(推定結果の期待値と計画値との差を意味する)の大きさを建築用のコンクリートを対象として検討したものである。

2. コンクリートのサンプリングが単位水量の推定値に及ぼす影響

単位水量の迅速測定に用いるコンクリートは、多くの場合トラックアジテータから採取される。

*1 全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所 (正会員)

*2 株式会社 久吉生コン 工場長 (正会員)

*3 全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所 所長 工博 (正会員)

そこで、トラックアジテータから排出されるコンクリートを約1m³間隔でサンプリングして単位水量の推定を行い、サンプリングに起因する推定値の変動について検討を行った。

2.1 使用材料及びコンクリート配合

実験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³, 比表面積 3,300cm²/g)で、細骨材は山砂(密度 2.60g/cm³, 吸水率 1.85%, 微粒分量 2.52%, 粗粒率 2.00)と砕砂(密度 2.65g/cm³, 吸水率 2.33%, 微粒分量 2.20%, 粗粒率 3.37)とを7:3の割合で混合したもの、粗骨材は砕石 2005(密度 2.67g/cm³, 吸水率 1.80%, 微粒分量 0.53%, 粗粒率 6.61)を用いた。混和剤はN社製のAE減水剤を用いた。また、実験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。

2.2 実験方法

コンクリートの練混ぜは、容量3m³の強制練りミキサにより、1バッチの量を2.25m³として2バッチ連続で行った。試験に用いるコンクリートは、練混ぜ完了後のコンクリートをトラックアジテータに積み込み、約15分間市街地を走行した後、排出開始から排出を停止することなく、0.1m³, 1m³, 2m³, 3m³, 4m³及び4.4m³の時点で約60Lずつサンプリングした。単位水量の迅速推定は全生工組連試験方法ZKT-210¹⁾に従って行った。また、空気量試験終了後のコンクリートを公称目開き4.75mmのふるい上で水洗いして粗骨材を取り出し、その空中質量(表乾)を測定し、その結果からコンクリートの均質性を評価した。なお、実験は3回繰り返した。

2.3 実験結果及び考察

図-2はトラックアジテータからサンプリングしたコンクリートのスランプ試験結果と空気量試験に用いたコンクリート中の粗骨材量の測定結果とを併せて示したものである。図-2において、スランプの試験値は排出初期と累計排出量4m³以降の値が小さくなっている。また、粗骨材量は排出初期と累計排出量4m³以降の値が大きくなっており、スランプとの間に関連性が認められた。これらに比べ、単位水量の推定結果は図-3に示すようであって、スランプや粗骨材量との関連性は認められず、その値は1

表-1 コンクリートの配合

スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
18	57.3	4.5	48.7	178	311	863	929	3.33

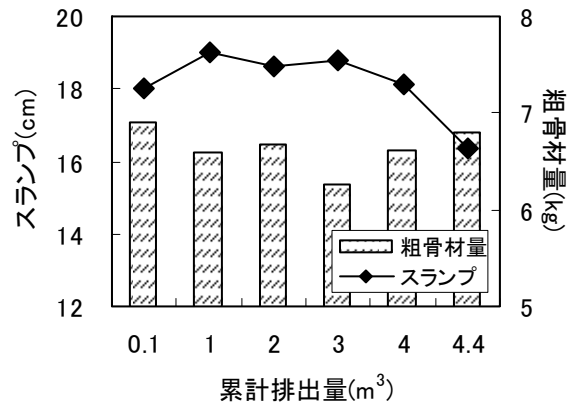


図-2 スランプ及び粗骨材量測定結果

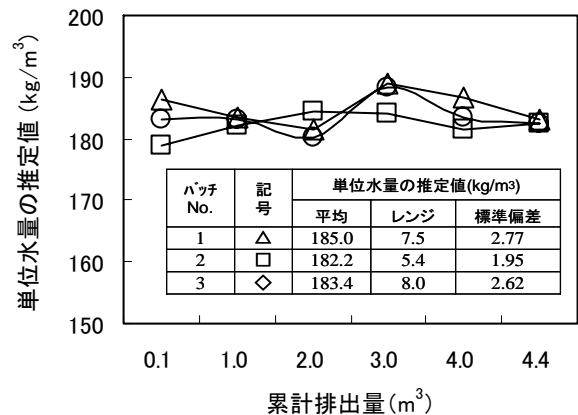


図-3 単位水量推定結果

回目が 181.5~189.1kg/m³, 2 回目が 178.9~184.3kg/m³, 3 回目が 180.2~188.2kg/m³となっている。これは、高周波加熱法の場合、モルタルを試料とすることから、粗骨材量の変動によるコンクリートの品質変化の影響を受けにくいためと思われる。なお、推定値の偏りについては、同時に行ったコンクリートをウェットスクリーニングせずにそのまま高周波加熱装置で乾燥した場合の推定値が 198.5~203.4kg/m³(平均 200.1kg/m³)であったことから、15~18kg/m³程度と推測される。また、単位水量の推定値が計画値より大きくなった理由としては、骨材の表面水率の測定誤差が考えられる。

3. コンクリート及びモルタル試料の縮分が単位水量の推定値に及ぼす影響

ウェットスクリーニングするコンクリートの

量及びウェットスクリーニングによって採取したモルタル試料からの縮分量の相違が単位水量の推定値に及ぼす影響について検討した。

3.1 使用材料及びコンクリートの配合

実験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ，比表面積 $3,290\text{cm}^2/\text{g}$ ）で、細骨材は土佐産海砂（密度 2.62g/cm^3 ，吸水率 1.72% ，微粒分量 2.17% ，粗粒率 1.93 ）と物部川産川砂（密度 2.62g/cm^3 ，吸水率 1.52% ，微粒分量 1.89% ，粗粒率 3.31 ）とを $3:7$ の割合で混合したもの、粗骨材は春野産碎石 2005（密度 2.62g/cm^3 ，吸水率 1.07% ，微粒分量 0.65% ，粗粒率 6.82 ）を用いた。また、混和剤は N 社製の AE 減水剤を用いた。また、実験に用いたコンクリートの配合を表-2 に示す。

3.2 実験方法

コンクリートの練混ぜは、容量 20L の可傾式ミキサを用いて、1 バッチの量を 15L として行った。コンクリートの縮分に関する実験では、表-2 に示す水セメント比 50% のコンクリートについて、ウェットスクリーニングによって得られるモルタルの量が 200、400 及び 600g となるように、あらかじめ求めておいた量のコンクリートをウェットスクリーニングした。単位水量の推定は、ウェットスクリーニングによって得られたモルタルの全量を試料とし、ZKT-210 に従って行った。また、モルタル試料の縮分量に関する実験では、表-2 に示すすべての配合のコンクリートについて、ウェットスクリーニングによって得られるモルタルの量が 400、600 及び 800g となる量のコンクリートをウェットスクリーニングした。単位水量の推定は、ふるいを通したモルタルから練りさじによって 400g の試料を採取し、ZKT-210 に従って行った。

3.3 結果及び考察

コンクリートの縮分に関する実験結果は表-3 に示すようであって、単位水量の推定値は全体として配合値より小さく、その差はウェットスクリーニングするコンクリートの量が多くなるほど小さくなっている。これは、ふるい、練りさじ及び受け皿に付着するモルタルの量がウェットスクリーニングするコンクリートの量に

表-2 コンクリートの配合

スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
				W	C	S	G	Ad
18	40	4.5	48.0	185	463	783	849	1.158
	50				370	820	891	0.925
	60				308	846	914	0.770

表-3 単位水量推定結果

モルタルの量 (g)	単位水量(kg/m^3)				
	配合値 a	推定値 b	差 b-a	レンジ	標準偏差
200	185	169.7	-15.3	2.6	1.31
400		176.8	-8.2	2.0	1.06
600		177.4	-7.6	2.2	1.11

注) 試験の繰返し回数は 3 回とした。

表-4 単位水量推定結果

W/C (%)	モルタルの量 (g)	単位水量(kg/m^3)				
		配合値 a	推定値 b	差 b-a	レンジ	標準偏差
40	400	185	176.3	-8.7	2.6	1.47
	600		177.3	-7.7	2.3	1.15
	800		178.8	-6.2	1.0	0.55
50	400		176.8	-8.2	2.0	1.06
	600		177.5	-7.5	2.7	1.35
	800		177.8	-7.2	2.4	1.21
60	400		174.6	-10.4	2.4	1.21
	600		175.8	-9.2	1.7	0.98
	800		176.9	-8.1	1.8	0.96

かかわらず一定のため、コンクリートの量が多いほど、推定値に及ぼす影響が小さくなるためである（後述 4. 参照）。また、推定値の標準偏差は $1.06\sim 1.31\text{kg/m}^3$ の範囲にあり、ウェットスクリーニングするコンクリートの影響は明確でない。つぎに、表-4 はウェットスクリーニングによって得たモルタル試料をさらに縮分した場合の単位水量の推定値を示したものである。表-4 において、単位水量の推定値はウェットスクリーニングするコンクリートの量が多くなることもない、わずかに大きくなっている。これに比べ、水準毎の標準偏差は $0.55\sim 1.47\text{kg/m}^3$ となっており、モルタル試料の縮分量の相違が推定値の変動に及ぼす影響は明確でない。

4. 粗骨材や使用器具に付着するモルタルが単位水量の推定値に及ぼす影響

コンクリートをウェットスクリーニングした場合、粗骨材、ふるい及びモルタルの受皿にモ

ルタルが付着するため、その前後ではモルタルを構成する材料の割合が変化する。そこで、粗骨材や試験器具に付着したモルタルを構成する各材料の量を洗い分析によって求め、単位水量の推定値に及ぼす影響について検討を行った。

4.1 使用材料及びコンクリートの配合

実験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³，比表面積 3,260cm²/g）を公称目開き 75μm のふるいでふるい分け、その通過分を用いた。細骨材は浜岡産陸砂（表乾密度 2.63 g/cm³，吸水率 1.63%，微粒分量 1.30%，F.M.2.53）を公称目開き 75μm のふるい上で水洗いし、ふるいとどまったものを表乾状態に調整して用いた。粗骨材は青梅産碎石 2005（表乾密度：2.63 g/cm³，吸水率 0.54%，微粒分量 0.69%，F.M.6.71）を公称目開き 4.75mm のふるい上で水洗いした後、ふるいとどまったものを表乾状態に調整して用いた。混和剤は N 社製の AE 減水剤及び高性能 AE 減水剤を用いた。また、実験に用いたコンクリートの配合を表-5 に示す。

4.2 実験方法

コンクリートの練混ぜは 1 バッチの量を 850g とし、セメント、細骨材、練混ぜ水の順に手練り用練り鉢内で計量した後、練りさじによって 90 秒間練り混ぜた。その後、モルタルの入った練り鉢内に粗骨材を累加計量し、さらに 60 秒間練り混ぜた。つぎに、練混ぜたコンクリートを全量ウェットスクリーニングし、ふるいを通したモルタルの全量を加熱乾燥した。単位水量の推定計算は、ZKT-210 とこれを洗い分析で求めた付着モルタル中の各材料を用いて補正する方法とで行った。ZKT-210 に示される推定式と洗い分析結果を用いて補正を行う場合の推定式を式(1)及び式(2)にそれぞれ示す。

4.3 結果及び考察

実験結果は図-4 に示すようになって、ZKT-210 によって計算した単位水量の推定値は、水セメント比 40% のコンクリートが、平均 169.6kg/m³，50% が平均 167.9kg/m³，60% が平均 166.4kg/m³ であって、配合値(185kg/m³)に対して 15~20kg/m³ 程度のマイナス側の偏りが生じている。つぎに、洗い分析によって求めた付着モ

表-5 コンクリートの配合

スランプ (cm)	W/C (%)	空気 量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
18	40	4.5	44.2	185	463	722	910	4.62 ^{※1}
	50		42.5	370	727	982	0.925 ^{※2}	
	60		42.4	308	779	1060	0.770 ^{※2}	

※1 高性能 AE 減水剤，※2 AE 減水剤

$$W_E = \{(Mm_1 - Mm_2) - X_1 + X_2\} \cdot \frac{W_u + C_u + S_u}{M_{m1}} \quad (1)$$

$$W_{E1}' = \{(Mm_1 + M_w - Mm_2) - X_1 + X_2\} \cdot \frac{W_u + C_u + S_u}{M_{m1} + M_w + M_s + M_c} \quad (2)$$

- ここに、 W_E ：単位水量の推定値 (kg/m³)
 W_{E1}' ：ウェットスクリーニングによる誤差を補正した単位水量の推定値 (kg/m³)
 Mm_1 ：加熱乾燥前のモルタルの質量 (g)
 Mm_2 ：加熱乾燥後のモルタルの質量 (g)
 M_w ：付着モルタル中の水量 (g)
 M_c ：付着モルタル中のセメント量 (g)
 M_s ：付着モルタル中の細骨材量 (g)
 W_u ：単位水量の調合値 (kg/m³)
 C_u ：単位セメント量の調合値 (kg/m³)
 S_u ：細骨材の調合値 (kg/m³)
 X_1 ：高周波加熱装置を用いて測定した細骨材の吸水率の補正值 (g)
 X_2 ：混和剤に含まれる固形分の補正值 (g)

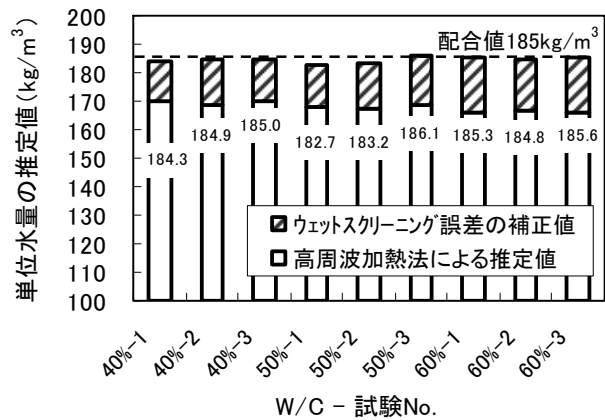


図-4 単位水量の推定結果

表-6 モルタルを構成する各材料の割合

計画調合		付着モルタル	
W/C(%)	S/C	M _w [※]	S/C
40	1.6	13.5	0.9
50	2.0	14.4	1.1
60	2.5	14.6	1.4

※コンクリート 850g をウェットスクリーニングした場合の付着モルタル中の水量(g)

ルタル中に含まれる各材料の割合は、表-6 に示すようになって、粗骨材や器具には細骨材量の少ないモルタルが付着している。これは、粗骨材や器具に付着するモルタルのうち、比較的粒径の大きい細骨材が、振動を加えることによ

り分離し、ふるいを通過したためであり、その結果、単位水量の推定値に偏りが生じたものと思われる。また、洗い分析によって求めた付着モルタル中の水量を用いてウェットスクリーニングによって生じる偏りを補正した場合の推定値は図-4に併記したようであって、水セメント比に係わらず配合値に近似した値となる。

つぎに、図-5は、粗骨材及び各器具に付着するモルタルの構成材料の測定結果をもとに、ウェットスクリーニングするコンクリートの量と単位水量の推定値との関係を計算によって求めたものである。計算にあたって、粗骨材に付着するモルタルの量は、前述のコンクリート量850gの実験値を基準として粗骨材量の増減に比例して変化するものとし、また、器具に付着するモルタルの量は、コンクリートの量にかかわらず一定と考え、コンクリートの量が850gのときの実験値を用いた。また、図には、計算によって求めた推定値と配合値との差が-5、-10及び-15kg/m³となるコンクリートの量を併せて示した。図-5において、単位水量の推定値はウェットスクリーニングするコンクリートの量が多くなるほど大きくなっているが、2kgを超えると推定値の増加量は緩やかになり5kg程度になるとほとんど増加しなくなる。これは、コンクリートの量が2kg程度までは、コンクリート量の増加にともない器具に付着するモルタルの影響が小さくなるものの、粗骨材に付着するモルタルは多くなるためである。したがって、ウェットスクリーニングするコンクリートの量が大きく変動する場合には、推定値に及ぼす影響を別途検討する必要がある。

5. 高周波加熱法による単位水量の推定精度

高周波加熱法の測定精度を検討するためには、サンプリングの影響を排除する必要がある。そこで、試料の乾燥容器内練り混ぜたモルタルを用いて、単位水量の推定を行った。

5.1 使用材料及びコンクリートの配合

実験には4.に示すセメント及び細骨材を粒度調整せず用いた。また、コンクリートの配合は前述の表-5に示すものを用いた。

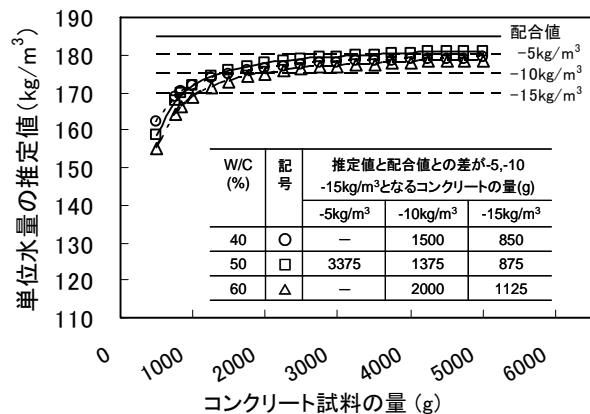


図-5 コンクリート試料の量と単位水量の推定値との関係(計算値)

表-7 単位水量推定結果

W/C (%)	練混ぜ水の計量値 a (g)	細骨材の吸水量* b (g)	質量減少量 c (g)	差 (c-b)-a (g)	単位水量の推定値の変動 (kg/m ³)
40	54.0	3.8	57.7	-0.1	-0.34
			57.7	-0.1	-0.34
			57.6	-0.2	-0.69
50	57.7	4.1	61.8	0	0.00
			61.6	-0.2	-0.64
			61.6	-0.2	-0.64
60	58.2	4.5	62.5	-0.2	-0.64
			62.6	-0.1	-0.32
			62.6	-0.1	-0.32

※ 吸水率を1.86% (高周波加熱装置による値²⁾)として計算。

5.2 実験方法

実験には、前述表-5に示す配合のコンクリートから計算上粗骨材を取り除いたモルタルを用いた。モルタルの練混ぜは、1バッチの量を400gとし、試料容器内でセメント及び細骨材を計量した後、所定量の練混ぜ水を約2g残して累加計量し、さじを用いて手練りによって約2分間行った。練混ぜ完了後、さじに付着したモルタルを練混ぜ水の残り約2gで試料容器内に洗い流し、使用材料の全てを試験に供した。単位水量の推定は、ZKT-210に従って行った。

5.3 実験結果及び考察

単位水量の推定結果は表-7に示すようであって、乾燥によるモルタルの質量減少量に細骨材の吸水量の補正を加えた値と練混ぜ水の計量値との差は0~-0.2gとなっている。これらの差が単位水量の推定値に及ぼす影響は0~-0.69kg/m³であり、高周波加熱法においては、代表的な試料をサンプリングできれば、推定値の変動は小さく、変動の大半がサンプリングに

起因するものであることが分かる。

$$e\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_2^2} \quad (3)$$

6. 単位水量の推定値の変動と偏り

2.～5.までの実験結果から求めた単位水量の推定値の変動を総括し表-8に示す。表-8に示した「b)コンクリートの分取」と「c)モルタル試料の分取」については、実験内容が類似したため、「c)モルタル試料の分取」よりも変動が小さい「b)コンクリートの分取」のデータを考慮しないこととした。また、「a)コンクリートのサンプリング」の標準偏差及びレンジには「c)モルタル試料の分取」及び「d)推定精度」が、「c)モルタル試料の分取」には「d)推定精度」の変動が含まれるので、これらを分離した作業工程毎の変動を表-8の右側に併記した。なお、工程毎の変動は式(3)及び式(4)からそれぞれ求めた。一般にある測定の変動は、データ数が多い場合には標準偏差から、データ数が少ない場合には測定値が矩形分布すると仮定して変動を求める。本実験における各試験の繰返し数が3又は6回であることを考慮すると、測定値が矩形分布すると仮定して変動を求めることになるが、単位水量の推定値は対象とするコンクリートの品質が同一の場合、データ数が多くなれば、その分布が正規分布に近似すると考えられるので、標準偏差から求める方法を採用した。表-8において、標準偏差から求めた全体の変動は2.77kg/m³ (分離前の a)の標準偏差)であって、その95%の信頼限界幅は±5.5kg/m³となる。また、工程毎に分離した変動は「a)コンクリートのサンプリング」の±2.38kg/m³ (95%信頼限界幅±4.8kg/m³)が最も大きく、全体の85%程度となっている。

つぎに、推定値の偏りについては、ウェットスクリーニングによるモルタルの構成材量の変化が対象となる。これについては、コンクリートの配合、粗骨材や混和剤の種類等によって、その大きさが相違すると考えられるが、本実験の範囲では、単位水量の配合値に対して15～20kg/m³のマイナス側の偏りが認められた。

なお、別途行った実験の結果^{1), 2)}において、注水から測定開始までの時間や試料温度及び、

$$eu = \sqrt{\left(\frac{R_1}{\sqrt{12}}\right)^2 - \left(\frac{R_2}{\sqrt{12}}\right)^2} \quad (4)$$

ここに、 $e\sigma$: 工程毎の標準偏差, σ_1 : 全体の標準偏差
 σ_2 : σ_1 と重複する標準偏差, eu : 矩形分布として求めた工程毎のばらつき, R_1 : 全体のレンジ
 R_2 : R_1 と重複するレンジ (単位はすべて kg/m³)

表-8 単位水量の推定値のばらつき

作業工程	標準偏差 σ	レンジ R	工程毎のばらつき	
			標準偏差 $e\sigma$	矩形分布 eu
a)コンクリートのサンプリング	2.77	8.0	2.38 (4.8)	2.17 (4.3)
b)コンクリートの分取	1.31	2.6	1.26 (2.5)	0.69 (1.4)
c)モルタル試料の分取	1.41	2.7	1.36 (2.7)	0.72 (1.4)
d)高周波加熱法による単位水量の推定精度	0.37	1.0	0.37 (0.7)	0.29 (0.6)

注) 表中カッコ内の数値は、95%の信頼限界幅を示す。
 単位 : [kg/m³]

高周波加熱法の庫内温度が単位水量の推定値に及ぼす影響が明確でないことから、これらの変動は含めないこととした。

7. まとめ

単位水量迅速推定の各作業工程における推定値の変動や偏りの大きさについて検討を行った。この研究によって得られた成果を要約すれば以下のとおりである。

- (1) 高周波加熱法における推定値の変動は±5.5kg/m³程度であり、その85%はサンプリングに起因するものであった。
- (2) 推定値の偏りは、コンクリートをウェットスクリーニングすることによって生じ、本実験における偏りの大きさは-15～-20kg/m³程度であった。

参考文献

- 1) 全生工組連 : ZKT-210 フレッシュコンクリートの単位水量迅速推定試験方法 (高周波加熱法), 2002.6
- 2) 辻本, 寺石, 鈴木 : 高周波加熱法による単位水量推定の信頼性について、日本コンクリート工学会年次講演概要集, Vol.25, No.1, pp.947-952, 2003.6