

論文 高周波加熱法によるフレッシュコンクリートの単位水量の迅速推定に関する基礎研究

辻本 一志^{*1}・寺石 文雄^{*2}・鈴木 一雄^{*3}

要旨：高周波加熱法によって単位水量の迅速推定を行う場合のモルタルの加熱に用いる紙皿の質量減少，セメントの結合水及び細骨材の吸水率の補正方法，試料採取に不可欠であるウェットスクリーニングの方法が単位水量の推定値に及ぼす影響について検討を行った。実験の結果，紙皿の質量減少は無視できないこと，セメントと結合する練混ぜ水の補正が不要であること，細骨材の吸水率については高周波加熱装置で骨材を乾燥させて求めた吸水率を用いればよいことが分かった。また，ウェットスクリーニング前後におけるモルタルの構成材料が異なり，推定値に影響を及ぼすことが分かった。

キーワード：フレッシュコンクリート，単位水量，迅速推定，高周波加熱法

1. はじめに

生コンクリートの単位水量は，構造物の耐久性を左右する重要な品質項目であるため，近年生コンクリート工場及び建設現場においてこれを試験するケースが増えつつある。現在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が，中でも試験機器の価格が比較的安価で試験時間も短い高周波加熱法が多く用いられている。本研究は，高周波加熱法による単位水量の推定方法について，試験結果に影響を及ぼす要因を検討し，単位水量の推定精度を向上させるために必要となる基礎データの収集を行ったものである。

2. 実験の概要

単位水量の合理的な推定方法の検討にあたっては，試験員の負担を増やすことなく試験精度を向上させることを目標とし，「まだ固まらないコンクリートの単位水量の試験方法（加熱乾燥法）」¹⁾の一部を変更することとした。

以下に検討項目を示す。

紙皿の質量変化が単位水量の推定値に及ぼ

す影響

推定に用いるセメントの結合水率の適正值
細骨材の吸水率がモルタルの乾燥時間に及ぼす影響

細骨材の吸水率の測定方法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方法が単位水量の推定値に及ぼす影響

3. 紙皿の質量減少が単位水量の推定値に及ぼす影響

3.1 使用材料

実験には，普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³），山砂（表乾密度：2.59g/cm³，吸水率：2.98%，微粒分量：1.5%，粗粒率：2.35），硬質砂岩碎石 2005（表乾密度：2.65g/cm³，吸水率：1.39%，微粒分量：0.56%，粗粒率：6.71）を用いた。また，混和剤として AE 減水剤及び高性能 AE 減水剤を用いた。

3.2 使用機器

実験には，高周波加熱装置として高周波出力 1,600W の業務用電子レンジ，試料容器として直径 21cm の紙皿を用いた。

*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 高知県生コンクリート東部協同組合共同試験所 所長（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）

3.3 コンクリートの配合

実験に用いたコンクリートの配合は、単位水量を 185kg/m³ とし、水セメント比を 40、50 及び 60% に変化させた 3 配合について、スランプが 18±1cm、空気量が 4.5±1% となるように、試験練りによって表 - 1 のように定めた。

3.4 試験方法

(1) モルタルの練混ぜ

本実験では、ウエットスクリーニングの影響を排除するために、表 - 1 に示すコンクリートから粗骨材を除いた配合のモルタルを 1 バッチ 400g として練混ぜた。

(2) モルタルの加熱及び紙皿の質量測定

モルタルの加熱は、予め 1 分間加熱した紙皿に練混ぜ完了後のモルタルを全量移して加熱前の質量測定を行った後、高周波加熱装置によって行った。モルタルの加熱中における紙皿の質量は、加熱時間 4、5 及び 6 分の時点において一旦モルタルを取り除いて測定した。なお、実験は繰返し 5 回行った。

(3) 単位水量の計算

単位水量の計算は、次式を用いて行った。

$$X_1 = C_U \frac{M_1}{100 \cdot (W_U + C_U + S_U)} \quad (1)$$

ここに、 X_1 ；セメントの結合水分の補正量(g)
 ρ ；セメントの結合水率(%) (=1.4%)
 W_U ；配合上の単位水量(kg/m³)
 C_U ；配合上の単位セメント量(kg/m³)
 S_U ；配合上の細骨材の単位量(kg/m³)
 M_1 ；モルタルの採取量(g)

$$X_2 = \left(\frac{Q}{100 + Q} \right) S_U \frac{M_1}{(W_U + C_U + S_U)} \quad (2)$$

ここに、 X_2 ；細骨材の吸水分の補正量(g)
 Q ；JIS A 1109 による細骨材の吸水率(%)

$$X_3 = Ad_U \frac{P}{100} \cdot \frac{M_1}{(W_U + C_U + S_U)} \quad (3)$$

ここに、 X_3 ；固形分補正量(g)
 Ad_U ；配合上の混和剤の単位量(kg/m³)
 P ；混和剤中の固形分率(%)

$$W = \left\{ (M_1 - M_2) + X_1 - X_2 + X_3 \right\} \frac{(W_U + C_U + S_U)}{M_1} \quad (4)$$

ここに、 W ；単位水量の推定値(kg/m³)
 M_2 ；加熱後のモルタルの質量(g)

表 - 1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
40	40.3	185	462	652	986	4.62 ¹
50	43.0	185	370	727	986	925 ²
60	44.7	185	307	779	986	768 ²

1 高性能 AE 減水剤， 2 AE 減水剤 (単位：ml/m³)

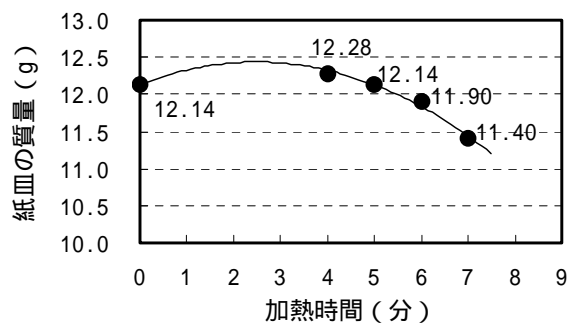


図 - 1 加熱時間と紙皿の質量との関係

3.5 実験結果

モルタルの加熱中における紙皿の質量の推移は図 - 1 に示すようであって、紙皿の質量は加熱時間 4 分において一時的に 0.14g 増加したが、その後加熱時間の増加にともない減少する傾向となった。また、加熱時間が 5 分を超えると紙皿の底面が炭化することによって質量の減少割合が大きくなり、紙皿の質量は加熱時間 6 分で 0.24g、7 分で 0.74g 減少した。これらが推定値へ及ぼす影響は加熱時間 6 分で約 0.8kg/m³、7 分で約 2kg/m³ である。したがって、試料容器として紙皿を用いた場合には、質量減少量によって乾燥終了の判定を行うことは困難と思われる。

4. セメントの結合水率の適正值

4.1 試験方法

実験に用いたセメントペーストの配合は、水セメント比を 40、50 及び 60% の 3 種類とした。練混ぜは、1 バッチを 0.4l のコンクリートから細骨材及び粗骨材を除いた量とし、セメントを磁器蒸発皿内で計量した後、所定量の水を 2g 残して累加計量し、さじを用いて手練りによって約 1 分間行った。練混ぜ完了後、さじに付着したセメントペーストを練混ぜ水の残り約 2g で蒸発皿内に洗い流し、使用材料の全てを加熱した。セメントペーストの加熱は、加熱前の質

量を 0.1g の精度で測定した後，高周波出力 1,600W の高周波加熱装置を用いて質量減少量が 0.1g となるまで行った。

4.2 実験結果

図 - 2 はセメントペーストの加熱時間と加熱前後の質量差から求めたセメントペースト中に残留する水分量との関係を示したものである。

図 - 2 において，セメントペースト中に残留する水分（残留水分率）は，水セメント比にかかわらず加熱時間 5 分で 0 となった。このことより，高周波加熱法における結合水の補正は不要と考えられる。なお，従来どおり結合水の補正を行った場合には，単位セメント量を 300kg/m^3 とすると，推定値は 5kg/m^3 大きくなる。

5. 細骨材の吸水率の相違が単位水量の推定値に及ぼす影響

5.1 使用材料

実験には，普通ポルトランドセメント（密度： 3.16g/cm^3 ）表 - 2 に示す吸水率の概略値が 1%，2%，3% 及び 8% の細骨材，最大寸法 25mm の川砂利（表乾密度： 2.63g/cm^3 ，吸水率：0.76%，微粒分量：0.39%，粗粒率：7.15）を用いた。また，混和剤として AE 減水剤を用いた。

5.2 使用機器

実験には，高周波加熱装置として高周波出力 1,600W の業務用電子レンジ，試料容器として直径 21cm の紙皿を用いた。また，細骨材の吸水率の測定には直径 15cm の磁器蒸発皿を用いた。

5.3 コンクリートの配合

コンクリートの配合は，スランプの目標値を $18 \pm 1\text{cm}$ ，空気量の目標値を $4.5 \pm 1\%$ とし，試験練りによって表 - 3 のように定めた。

5.4 試験方法

(1) モルタルの練混ぜ

本実験においては，ウェットスクリーニングの影響を排除するために，表 - 3 に示すコンクリートから粗骨材を除いた配合のモルタルを練混ぜ，単位水量の推定に用いた。モルタルの練混ぜは，容量 5l のホバートミキサを用いて 1 バ

表 - 2 細骨材の物理試験結果

記号	種類	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	微粒分量 (%)	粗粒率
A	砕砂	2.66	1.19	1.74	2.6	3.06
B	山砂	2.59	2.27	1.76	1.2	2.72
C	山砂	2.58	3.05	1.64	1.6	2.27
D	山砂	2.41	7.40	1.50	1.6	2.29

表 - 3 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
			W	C	S	G	Ad
A	61.7	55.0	185	300	987	806	600
B	55.0	44.0	165		793	1031	
C	57.0		171		782	1023	
D	58.3		175		725	1018	

AE 減水剤の単位： ml/m^3

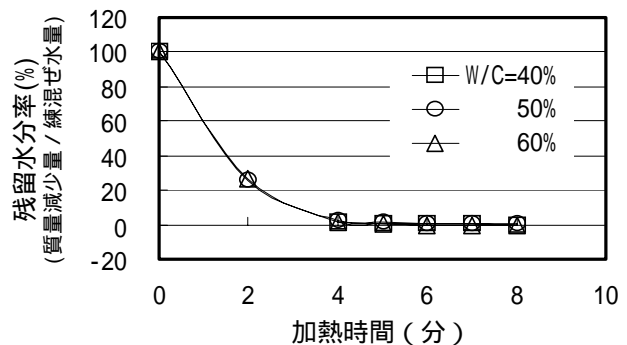


図 - 2 乾燥時間と残留水分率との関係

ツチの量を 2l として行った。

(2) モルタルの加熱及び質量測定

モルタルの加熱は，練混ぜ完了直後のモルタルを紙皿に移して加熱前の質量測定を行った後，高周波加熱装置によって質量減少量が 0.1g になるまで行った。モルタルの質量測定の間隔は，加熱開始から 4 分後に 1 回目を行い，以後 1 分間隔とした。

(3) 細骨材の吸水率の測定

表 - 3 に示す 4 種類の細骨材の吸水率を JIS A 1109 及び高周波加熱装置を用いた方法によって測定した。高周波加熱装置による方法は，試料の質量を 500g とし，加熱前の質量と加熱後の質量（乾燥による質量減少量が 0.1g となった時点）とを用い，JIS A 1109 に準拠して吸水率を計算した。試験の繰返し回数は 12 回とした。

(4) 単位水量の計算

単位水量の計算は、3.4 (3)と同様に行った。

5.5 実験結果

(1)細骨材の吸水率の相違が単位水量の推定値に及ぼす影響

吸水率の異なる4種類の細骨材を用いたコンクリートの単位水量の推定結果を表-4に示す。表-4において推定値の平均は、骨材の種類にかかわらず、すべて単位水量の配合値より大きくなっている。また、推定値と配合値との差は、吸水率が大きいものほど大きく、JIS A 1109によって求めた吸水率が1.19%の細骨材を用いた場合 0.8kg/m^3 、同様に2.27%が 2.3kg/m^3 、3.05%が 4.9kg/m^3 、7.40%が 41.2kg/m^3 となっている。

また、質量減少量が0.1gとなるまでの加熱時間はコンクリートの単位水量にかかわらず、細骨材の吸水率の大きいものほど長くなる傾向を示し、JIS A 1109によって求めた吸水率が1.19%の場合5.9分、同様に2.27%が6.9分、3.05%が8.7分、7.40%が12.5分となっている。

(2)細骨材の吸水率の測定方法が単位水量の推定値に及ぼす影響

高周波加熱法による単位水量の推定においては、細骨材に吸水されている水分も蒸発するため、これを吸水率によって補正することとなっている。しかし、高周波加熱装置による乾燥中のモルタルの温度は100℃を超えるため、JIS A1109によって求めた吸水率では、適正な補正ができないことが危惧される。そこで、JIS A 1109によって求めた吸水率と高周波加熱装置を用いて細骨材を加熱させて求めた吸水率とを比較した。結果は表-5に示すようであって、吸水率の試験値は高周波加熱装置で細骨材を加熱した方が大きな値を示し、両者の差はJIS A 1109による吸水率が1.19%の細骨材の場合0.08%、同様に2.27%が0.23%、3.05%が0.32%、7.40%が0.75%となっている。これらが推定値に及ぼす影響は、細骨材量を 900kg/m^3 とすると+1~4kg程度であり、前述5.5.(1)の推定値が配合値より大きくなった要因の一つと考えられる。

図-3はJIS A 1109による吸水率が3.05%の

表-4 加熱時間及び単位水量推定結果

細骨材の吸水率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位水量の推定値(kg/m ³)			モルタルの加熱時間(分)		
		平均	最大	最小	平均	最大	最小
1.19	185	185.8	186.8	184.3	5.9	7	5
2.27	165	167.3	168.2	166.7	6.9	8	6
3.05	171	176.1	176.4	175.3	8.7	9	8
7.40	175	216.2	216.8	215.8	12.5	13	10

表-5 細骨材の吸水率試験結果

記号	JIS A 1109 によって求めた吸水率(%)		高周波加熱装置によって求めた吸水率(%)		吸水率の差 - (%)
	吸水率	変動係数	吸水率	変動係数	
A	1.19	3.83	1.27	3.53	0.08
B	2.27	1.32	2.50	1.10	0.23
C	3.05	3.64	3.37	2.93	0.32
D	7.40	1.67	8.15	2.83	0.75

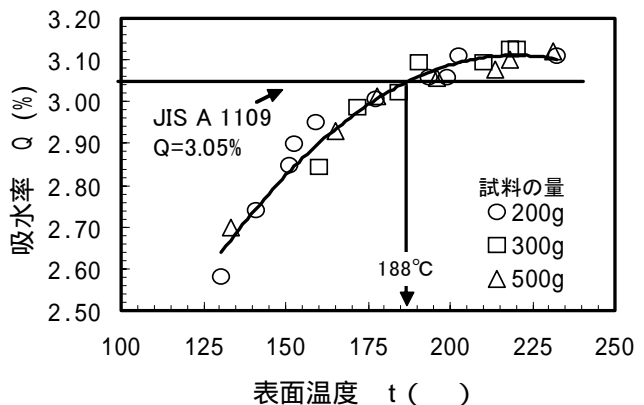


図-3 細骨材の表面温度と吸水率との関係

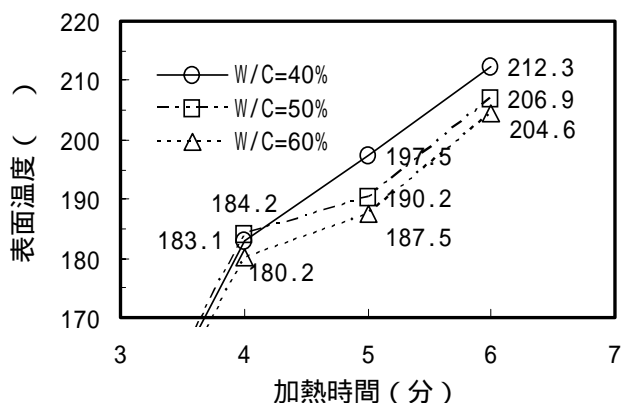


図-4 乾燥時間とモルタルの表面温度との関係

細骨材を用いて、乾燥中の細骨材の表面温度と各表面温度における質量減少量から求めた吸水率との関係を求めた結果である。図-3において、吸水率の試験値は試料の表面温度の増大に

ともなって大きくなる傾向を示しており，図中に示した JIS A 1109 による吸水率と一致する表面温度は 188 となっている。

なお、細骨材の表面温度は、質量測定の際に赤外線式表面温度計によって測定した。

図 - 4 は、モルタルの加熱時間とモルタルの表面温度との関係を示したものであって、モルタルの表面温度は、加熱時間 4 分で 180～184，5 分で 187～197，6 分で 204～212 となっている。この結果と図 - 3 を用いてそれぞれの加熱時間における吸水率を求めると、加熱時間 4 分の場合 3.03%，5 分が 3.09%，6 分が 3.13% となる。表 - 4 に示したモルタルの加熱時間の測定結果では、JIS A 1109 による吸水率が 3.05% の細骨材を用いた場合の加熱時間が約 9 分となっており、細骨材自身の質量減少量は JIS A 1109 に従って 105 ± 5 で乾燥させた場合よりも大きくなっていることが推測される。このため、推定値の計算には高周波加熱装置によって求めた吸水率を用いるのがよいと考えられる。

6. ウェットスクリーニング方法が単位水量の推定値に及ぼす影響

6.1 使用材料

実験には、普通ポルトランドセメント(密度： 3.16 g/cm^3)、川砂(表乾密度： 2.57 g/cm^3 ，吸水率： 4.25% ，粗粒率： 2.36)、石灰砕石 2005(表乾密度： 2.65 g/cm^3 ，吸水率： 2.42% ，実積率： 61.0% ，粗粒率： 6.59)、最大寸法 25mm の川砂利(表乾密度： 2.50 g/cm^3 ，吸水率： 3.88% ，実積率： 64.7% ，粗粒率： 6.76)及び AE 減水剤を用いた。

6.2 使用器具

実験には、ウェットスクリーニング用器具として、JIS Z 8801-1 に示される公称目開き 4.75mm の試験用ふるい及び振動周波数が 150Hz で振動面が平面の振動機を用いた。また、高周波加熱装置として高周波出力 1,600W の業務用電子レンジ、試料容器として直径 23cm の紙皿を用いた。

表 - 6 コンクリートの配合

粗骨材の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
			W	C	S	G	Ad
砕石	61.7	48.7	185	300	846	917	750
	56.1	48.0		330	822		820
	51.4	47.3		360	797		900
川砂利	61.7	47.7		300	828	882	380
	56.1	47.0		330	804		410
	51.4	46.2		360	779		450

AE 減水剤の単位： ml/m^3

6.3 コンクリートの配合

実験に用いたコンクリートの配合は、粗骨材を砕石及び川砂利の 2 種類とし、単位水量を 185 kg/m^3 ，単位セメント量を 300，330 及び 360 kg/m^3 に変化させた合計 6 配合について、スランプが $18 \pm 1 \text{ cm}$ ，空気量が $4.5 \pm 1\%$ となるように試験練りによって表 - 6 のように定めた。

6.4 実験方法

コンクリートのウェットスクリーニングは、練混ぜ完了直後のコンクリートから試料を約 800g 採取し、これを試験用ふるいに投入した後、手ふるい又は振動機によって行った。ウェットスクリーニング時間は、手ふるいの場合 1，2，5 分及び目視によって十分にふるい分けたと判定する方法の 4 水準，振動機の場合 0.5，1，2 分及び目視によって十分にふるい分けたと判定する方法の 4 水準とした。なお、モルタルの加熱乾燥は 5.4 (2)，単位水量の計算は 3.4 (3) と同様に行った。

6.5 実験結果

表 - 7 は、ウェットスクリーニング方法を変化させて採取したモルタルを用いて、単位水量の推定を行った結果を示したものである。表 - 7 において、単位水量の推定値は砕石を用いたコンクリートの場合 $168.3 \sim 178.4 \text{ kg/m}^3$ ，川砂利を用いたコンクリートの $172.6 \sim 185.2 \text{ kg/m}^3$ となっており、全体として川砂利を用いたコンクリートの推定値が大きくなっている。これは、粗骨材の形状及び表面性状の影響により、砕石よりも川砂利の方が粗骨材に付着したモルタルが分離しやすかったためと思われる。また、ウ

エットスクリーニング方法の影響としては、振動機を用いて2分間行った場合の推定値が配合に比較的近い値となった。

表-8は、表-1に示す配合のコンクリートをウエットスクリーニングし、粗骨材、ふるい、練り鉢に付着した水分、セメント分、細骨材の質量からウエットスクリーニングモルタルの構成材料を計算し、表-1から計算上粗骨材を除いたモルタルの配合と比較したものである。表-8において、ウエットスクリーニングモルタルの水量は、水セメント比が50%及び60%の場合、配合値より小さな値となり、それぞれの値は水セメント比40%が186kg/m³、50%が181kg/m³、60%が179kg/m³であった。また、水セメント比はセメント量が減少することにより大きくなった。このことより、ウエットスクリーニングモルタルを試料とする場合には、試料採取の時点で大きな試験誤差が生じていることを考慮しなければならない。

なお、水セメント比40%の水量が増えた理由としては、高性能AE減水剤の使用によりモルタルの降伏値が小さくなり、粗骨材等に付着したモルタルが分離しやすかったためと思われる。

7. まとめ

高周波加熱法による単位水量の推定方法について、試験結果に影響を及ぼす要因について検討し、試験条件の設定に必要な基礎データの収集を行った。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) 紙皿は加熱中に質量が減少する為、これを試料容器として用いる場合には質量減少量によって加熱終了の判定を行うことは困難と思われる。
- 2) 高周波加熱装置を用いて求めた細骨材の吸水率はJIS A 1109によって求めた吸水率より大きくなり、この傾向は吸水率の大きいものほど顕著である。
- 3) セメントペーストを高周波加熱装置で乾燥させた場合練混ぜ水量分の質量減少が認められた。
- 4) 配合に近い値が得られるウエットスクリーニ

表-7 ウエットスクリーニング条件の相違が単位水量の推定に及ぼす影響

粗骨材の種類	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量の推定値 ¹ (kg/m ³)				目視
		1分 ² 0.5分 ³	2分 ² 1分 ³	5分 ² 2分 ³		
碎石	300	168.3 176.6	169.0 172.6	167.8 178.1	167.8 176.1	
	330	172.0 176.7	173.0 176.8	169.9 178.4	170.4 178.1	
	360	174.5 178.4	178.3 177.4	173.7 178.3	175.8 176.4	
川砂利	300	174.8 179.6	178.1 179.9	176.8 180.4	175.5 180.5	
	330	172.6 175.8	175.0 178.7	175.0 180.4	177.7 182.1	
	360	177.1 178.4	179.4 181.4	178.0 180.7	179.2 184.1	

- 1 単位水量の推定値は、上段が手動、下段が振動機を示す。推定値は2回の平均値。
- 2 手ふるいによるウエットスクリーニング時間
- 3 振動機によるウエットスクリーニング時間

表-8 モルタルの構成材料の変化

	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		
		W	C	S
配合値	40.0	185	462	652
測定値	44.0	186	423	675
配合値	50.0	185	370	727
測定値	56.7	181	319	768
配合値	60.0	185	307	779
測定値	66.8	179	268	824

表中の測定値は、ウエットスクリーニングモルタルの構成材料を示す。

ング方法は、振動機を用いて2分間行った場合であった。また、ウエットスクリーニングを行うことによりモルタルの配合が変化するため、少量のウエットスクリーニングモルタルによって試験を行うためには、ウエットスクリーニングの方法について、さらに検討が必要である。

謝辞

本研究の実施にあたっては、静岡県コンクリート技術センターの川尻伸治氏、青森県生コンクリート工業組合技術研修センターの佐藤昭市氏にご協力いただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会，まだ固まらないコンクリートの単位水量の試験方法(加熱乾燥法)，コンクリートの早期迅速試験方法集，pp28-30，1988.3