

論文 コアを用いたコンクリートの単位水量試験方法の検討

湯浅 昇*¹・笠井芳夫*²・松井 勇*³・国本 正恵*⁴

要旨: 本研究は、φ 50mm のコンクリートコアを用いて、ペーストの吸水量と結合水量の和から練り混ぜ時の単位水量を評価する方法を検討したものである。実験では、吸水、絶乾、強熱方法を確立した。次に、混入空気量の影響が小さいことを示し、単位水量をコンクリート 1 m³ 当たりのペーストの見掛けの吸水量と結合水量の和から求める推定式を提案した。今回の結果によると、推定単位水量と調査上の単位水量との誤差の標準偏差は 3.9 kg/m³ であり、供試体数が 3 以上であれば、その平均が母平均と± 5 kg/m³ 以内にある信頼度は、96 % 以上であった。

キーワード: コンクリート, 単位水量, 試験方法, コア, 煮沸

1. はじめに

コンクリート構造物において、コンクリート中における水分は、構造躯体及び仕上材の劣化と密接な関係があるとされ、とりわけ、乾燥に伴う自由水の蒸発は、乾燥収縮をまねき、構造物にとって重大な欠陥であるひび割れを引き起こす。このひび割れ及びブリージングの防止を主目的に、1986 年はじめて JASS 5 「建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事」における「耐久性を確保するための材料・調査に関する規定」の中で、単位水量に上限が設けられた。しかしながら、現在に至っても硬化後にフレッシュコンクリートの単位水量を推定する方法がなく、コンクリートの品質管理上の問題点とされている。

本研究は、硬化コンクリートの吸水量より、練り混ぜ時の単位水量を測定する方法を検討するものである。

2. 単位水量試験方法の概要

2.1 測定原理

練り混ぜ時の水は、硬化コンクリートの結合水、自由水、空隙を構成すると考えられることから、結合水量と練り混ぜ時の混入空気に起因した空隙分を除いた空隙量の和は、単位水量を強く反映していると考えられることができる。ここでは、結合水量は強熱減量から、空隙量は吸水量から求めることとし、測定上の妨害因子による影響を補正することとする。

コンクリート 1 m³ における見掛けのペースト部分の吸水量(混入空気に起因した空隙含む)は、式(1)~式(4)によって求めることができる。

$$W_{wa} = W_{cd} - W_{sd} - W_{gd} \quad (1)$$

$$W_{cd} = \frac{\omega_{Cs} - \omega_{Cd}}{\omega_{Cs} - \omega_{Cw}} \times \rho_w \times 10^3 \quad (2)$$

$$W_{sd} = \frac{\omega_{Ss} - \omega_{Sd}}{\omega_{Ss}} \times S \quad (3)$$

$$W_{gd} = \frac{\omega_{Gs} - \omega_{Gd}}{\omega_{Gs}} \times G \quad (4)$$

ここに、 W_{wa} : コンクリート 1 m³ におけるペーストの見掛けの吸水量 (kg/m³)、 W_{cd} : コンクリート 1 m³ の吸水量 (kg/m³)、 W_{sd} : コ

* 1 日本大学専任講師 生産工学部建築工学科 工博 (正会員)

* 2 日本大学名誉教授 生産工学部建築工学科 工博 (正会員)

* 3 日本大学教授 生産工学部建築工学科 工博 (正会員)

* 4 日本大学大学院生 生産工学研究科建築工学専攻 (正会員)

ンクリート 1 m³ における細骨材の吸水量 (kg/m³), Wgd: コンクリート 1 m³ における粗骨材の吸水量 (kg/m³), ω_{cs}: コアの表乾質量 (g), ω_{cw}: コアの水中質量 (g), ω_{cd}: コアの絶乾質量 (g), ρ_w: 水の密度 (g/cm³), ω_{ss}: 細骨材の表乾質量 (g), ω_{sd}: 細骨材の絶乾質量 (g), S: 単位細骨材量 (kg/m³), ω_{gs}: 粗骨材の表乾質量 (g), ω_{gd}: 粗骨材の絶乾質量 (g), G: 単位粗骨材量 (kg/m³)

また、コンクリート 1 m³ 中のセメントの結合水量は、式(5)～式(8)によって求めることができる。

$$W_{cb} = W_{ci} - W_{si} - W_{gi} \quad (5)$$

$$W_{ci} = \frac{\omega_{cd} - \omega_{ci}}{\omega_{cs} - \omega_{cw}} \times \rho_w \times 10^3 \quad (6)$$

$$W_{si} = \frac{\omega_{sd} - \omega_{si}}{\omega_{ss}} \times S \quad (7)$$

$$W_{gi} = \frac{\omega_{gd} - \omega_{gi}}{\omega_{gs}} \times G \quad (8)$$

ここに、W_{cb}: コンクリート 1 m³ におけるセメントの結合水量 (kg/m³), W_{ci}: コンクリート 1 m³ 当たりの強熱減量 (kg/m³), W_{si}: コンクリート 1 m³ における細骨材の強熱減量 (kg/m³), W_{gi}: コンクリート 1 m³ における粗骨材の強熱減量 (kg/m³), ω_{ci}: コアの強熱後質量 (g), ω_{si}: 細骨材の強熱後質量 (g), ω_{gi}: 粗骨材の強熱後質量 (g)

よって、混入空気量を A (%) とすると、単位水量 W (kg/m³) は、式(9)で求めることができる。なお、ブリージング量は、旧 JASS 5-1986 p.114 解説図 2.3 によれば、0.6 ml/cm³ 超えず、これをコンクリート 1 m³ 当たりに換算しても 0.05 kg/m³ 程度でしかないので、無視した。

$$W = (W_{wa} - \frac{A}{100} \times 1000 \times \rho_w) + W_{cb} \quad (9)$$

2.2 測定手順

単位水量試験方法の作業の流れを図-1に示し、以下に測定の手順を示す。

(1) コンクリートコアマシンを用いて、構造

体から φ 50mm のコアを採取する。直径を 50mm の小径とする理由は、煮沸吸水及び乾燥に要する時間を短くするためである。

(2) コンクリートカッターを用いて、表面から 50 mm 以内の部分除去し、長さ 100 mm とし、これを供試体とする。コンクリートの表面は、脱型、中性化により、その内部と品質が異なることが知られている¹⁾。そこで、表面 50 mm を除去することとする。

(3) コアを十分煮沸吸水させ、20℃の恒温室中で自然冷却し、質量が恒量となるまで静置する。この時の水中質量及び表乾質量を測定する。

(4) コアを 105℃の乾燥炉内で、質量が恒量となるまで乾燥させ、絶乾質量を測定する。

(5) 絶乾質量を測定後、コアを 600℃の電気炉で質量が恒量となるまで加熱し、強熱減量を測定する。

なお、使用骨材が不明な場合、測定の原理上、コアから骨材の量、骨材の表乾比重、吸水量、強熱減量を求めなければならない、これらについても検討が必要であるが、今回はこれらを取り扱わず、既知の骨材を使用したコンクリートで主題である単位水量の試験方法を検討する。骨材に関する試験を検討するには、参考文献 2) が参考になるものと思われる。今後の検討課題と位置づけた。

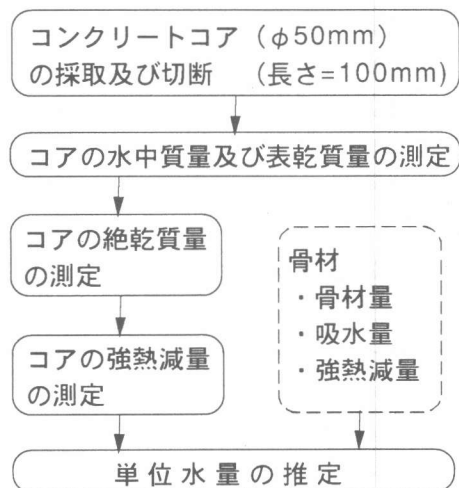


図-1 単位水量試験方法の作業の流れ

表-1 実験のシリーズと使用したコンクリート

試験体の種類	打設日	W/C (%)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	質量(kg/m ³)			混和剤(cc/m ³)			練り温 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	材齢28日 圧縮強度 (MPa)	単位水量 試験時の 材齢
					セメント	細骨材	粗骨材	No. 70	SP-8N	No. 303A*					
					シリ ーズ I	1998年 10月23日	60	4.5	202	337					
W60-45-185	185	308	828	944	771	-	1590	22.0	20.8	4.2	28.3				
W60-45-178	178	297	796	1005	742	-	1354	21.5	20.2	4.1	27.6				
W60-45-170	170	283	811	1023	708	-	1438	22.0	18.3	4.5	29.9				
W60-45-162	162	270	825	1041	1350	-	730	21.0	16.5	4.0	32.2				
シリ ーズ II	1998年 10月30日	60	1.0	185	308	893	966	-	-	-	22.0	19.2	0.9	34.9	6、12ヶ月
A60-30-185	3.0		308		867	940	770	-	1585	22.0	20.6	3.0	30.8		
A60-45-185	4.5		308		849	919	770	-	1714	19.1	21.5	4.6	25.3		
A60-60-185	6.0		308		831	898	770	-	3626	18.9	21.6	6.0	25.1		
シリ ーズ III	1999年 7月16日	30	4.5	185	616	545	969	-	6160	673	20.0	23.5	4.6	45.3	
C40-45-185	40	463			671	969	2315	-	2440	20.0	19.2	4.9	30.7		
C60-45-185	60	308			838	932	770	-	1730	19.0	21.4	4.4	23.2		
C80-45-185	80	231			865	969	578	-	1700	19.0	22.1	4.9	12.3		

*空気量調整剤は1%希釈溶液として使用

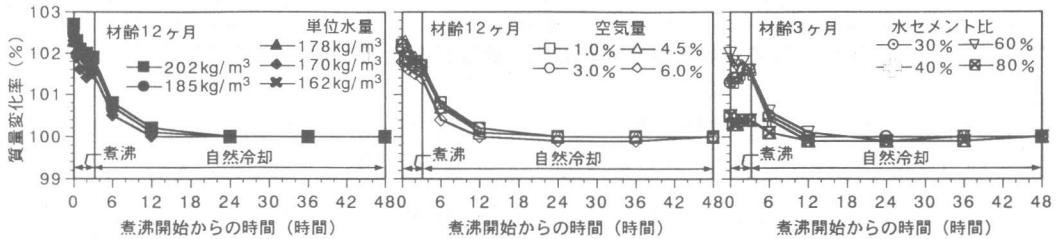


図-2 水中質量の変化 (48時間経過時の水中質量を100%とした場合)

3. 実験の概要

3.1 実験計画

ここでは、表-1に基づき作製した、I. 単位水量シリーズ、II. 空気量シリーズ、III. 水セメント比シリーズのコンクリートを用いて、2で示した単位水量試験を検証する。

3.2 使用材料

M社製普通ポルトランドセメント(比重3.16)、大井川水系川砂(表乾比重2.62、吸水率1.15%、絶乾基準の強熱減量0.93%、粗粒率2.83)、大井川水系川砂利(表乾比重2.66、吸水率0.85%、絶乾基準の強熱減量0.95%、粗粒率6.96)及びN社製AE減水剤(No.70)、N社製空気量調整剤(No.303A)を使用した。

3.3 供試体の作製及び養生

表-1に示す割合によりコンクリートを練り混ぜ、79×49×18cmの供試体を作製し、温度20℃の恒温室にて1週間封かん養生を行った。その後、本学実験室横の直接日射を受けない屋外にて、所定の材齢まで封かん養生を行った。

4. 実験結果及び考察

4.1 煮沸時間の検討

図-2は、煮沸した熱水の中にコアを入れてから48時間経過した時点の水中質量を100%とした時の水中質量の変化を示している。時間の経過に伴い、見かけ上水中質量が減少しているが、これは、温度が高いほど水の密度(99.9℃の時0.959 g/cm³、20.0℃の時0.998 g/cm³)は小さく、それに伴い浮力が減少したためである。これによると、コアを入れてから24時間でほぼ恒量となっていることがわかる。

4.2 105℃乾燥時間の検討

図-3は、コアの煮沸後の表乾質量を100%とした時の質量の変化を示している。これによると、加熱開始から7日間でほぼ恒量となっていることがわかる。

4.3 600℃強熱時間の検討

図-4は、コアの105℃乾燥後の絶乾質量を100%とした時の質量の変化を示している。6時間でほぼ恒量となっていることがわかる。

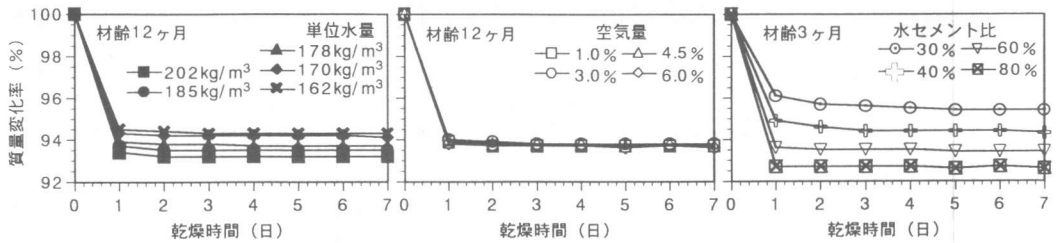


図-3 105°C乾燥に伴う質量変化(表乾質量を100%とした場合)

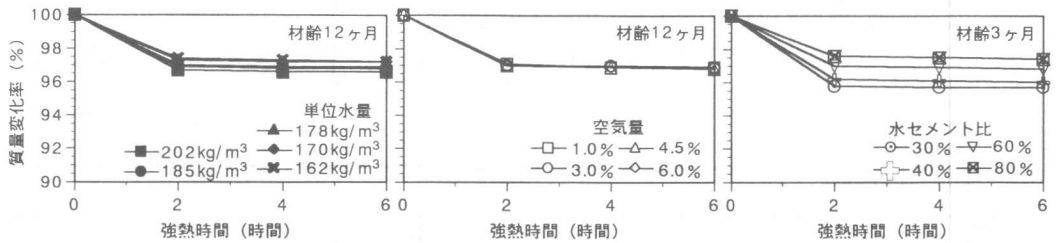


図-4 600°C乾燥に伴う質量変化(絶乾質量を100%とした場合)

4.4 使用した骨材の吸水量, 強熱減量

本実験で使用した骨材を試験した結果, 式(3), 式(4), 式(7), 式(8)は, それぞれ次の通りとなった。

$$\begin{aligned} W_{sd} &= 0.0114 \times S & (3)' \\ W_{gd} &= 0.0084 \times G & (4)' \\ W_{si} &= 0.0092 \times S & (7)' \\ W_{gi} &= 0.0094 \times G & (8)' \end{aligned}$$

4.5 割合上の単位水量と(Wwa+Wcb)の関係

図-5は, 所要空気量が4.5%で同じ, I. 単位水量シリーズについて, 割合上の単位水量 W_0 (kg/m^3) と, 混入空気に起因した空隙を含

むコンクリート 1 m^3 当たりのペーストの見掛けの吸水量と結合水量の和, すなわち $W_{wa} + W_{cb}$ (kg/m^3) の関係を示したものである。単位水量が多くなるにつれて, $W_{wa} + W_{cb}$ は大きくなっており, 両者の関係は, 相関係数 0.97 で, 式(10)に近似できる。

$$W_{wa} + W_{cb} = 1.01 \times W_0 - 4.65 \quad (10)$$

4.6 練り混ぜ時の空気量と(Wwa+Wcb)の関係

図-6は, 単位水量が $185 \text{ kg}/\text{m}^3$ で同じ, II. 空気量シリーズについて, 練り混ぜ時の空気量と $W_{wa} + W_{cb}$ の関係を示したものである。吸

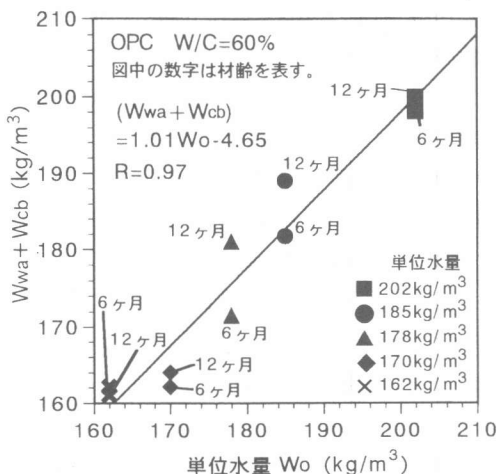


図-5 $W_{wa} + W_{cb}$ と単位水量の関係

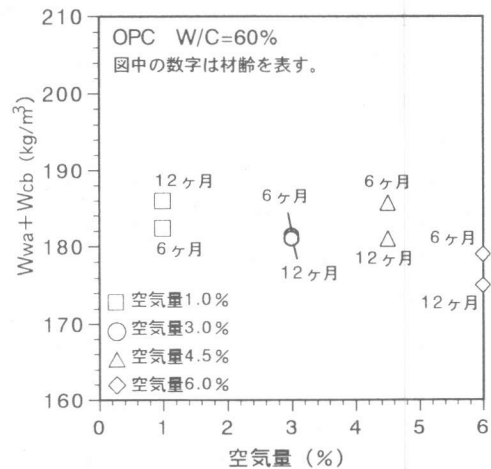


図-6 $W_{wa} + W_{cb}$ と混入空気量の関係

水量 W_{wa} は、空気量が 1% 大きくなると、式(9)で示すように、 10 kg/m^3 大きくなると予想していたが、実験結果では、練り混ぜ時の空気量の差が $W_{wa} + W_{cb}$ の差に反映されなかった。この理由は、現在のところ明解にはなく、今後の課題としたい。

しかしながら、実験結果は、練り混ぜ時の空気量に関係なく、本来は混入空気起因した空隙を含むコンクリート 1 m^3 当たりのペーストの吸水率 W_{wa} と結合水量 W_{cb} から単位水量を対応させることが可能であることを示すものである。そこで、水量の収支を厳密にあわせるのではなく、 $W_{wa} + W_{cb}$ との相関から単位水量

表-2 調合上の単位水量と推定単位水量の関係

試験体の種類	単位水量 (kg/m^3)	推定単位水量 (kg/m^3)			
		材齢3ヶ月	材齢6ヶ月	材齢12ヶ月	
シリーズ I	W60-45-202	202	-	200	202
	W60-45-185	185	-	184	191
	W60-45-178	178	-	174	183
	W60-45-170	170	-	165	166
	W60-45-162	162	-	165	163
シリーズ II	A60-10-185	185	-	185	188
	A60-30-185	185	-	184	183
	A60-45-185	185	-	188	183
	A60-60-185	185	-	181	177
シリーズ III	C30-45-185	185	182	-	-
	C40-45-185	185	190	-	-
	C60-45-185	185	189	-	-
	C80-45-185	185	192	-	-

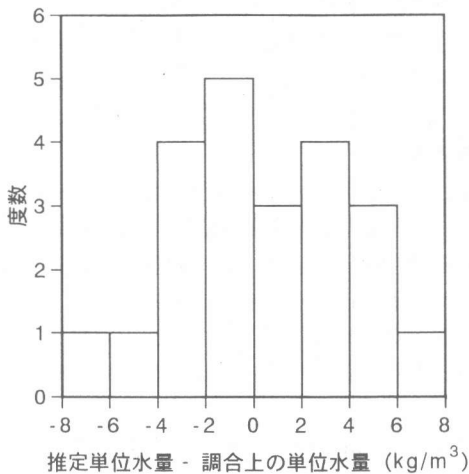


図-7 推定単位水量の誤差分布

W_0 を求める方法を提案するものである。

式(10)は、 W_0 を目的変数として変形すると、

$$W_0 = 0.99 \times (W_{wa} + W_{cb}) + 4.60 \quad (10)'$$

となり、試験に供することとする。

4.7 単位水量の推定

表-2は、それぞれのコンクリートの調合上の単位水量と、式(10)'を用いて求めた推定単位水量を示したものであり、図-7は、推定単位水量の調合上の単位水量との差の度数分布である。推定値と調合上の単位水量との誤差の標準偏差は 3.9 kg/m^3 であった。本試験方法により、概ね単位水量が推定できたものと評価する。

4.8 供試体数の検討

I. 単位水量シリーズの材齢 12 ヶ月における信頼度を式(11)によって算出される確率変数 u により、正規分布表から求めた。

$$u \leq \frac{|\bar{x} - m|}{\sigma} \times \sqrt{n} \quad (11)$$

ここに、 u ：確率変数、 \bar{x} ：標本平均 (kg/m^3)、 m ：母平均 (kg/m^3)、 $(\bar{x} - m)$ ：母平均に対する誤差 (kg/m^3)、 σ ：母集団の標準偏差 (= 標本標準偏差) (kg/m^3)、 n ：供試体数(本)

図-8は、許容する誤差をそれぞれ $\pm 5 \text{ kg/m}^3$ 、 $\pm 3 \text{ kg/m}^3$ 、供試体数を 1~5 本としたときの単位水量と信頼度との関係を示したものである。供試体数が 3 以上であれば、その平均が母平均と $\pm 5 \text{ kg/m}^3$ 以内にある信頼度は、96% 以上であった。よって、一試験に供する標準供試体数は、3 とする。

5. 単位水量試験方法の提案

ここまでの検討結果から、「コアを用いたコンクリートの単位水量試験方法」を下記の通り提案する。

1. 単位水量試験の操作

- ①コンクリートコアマシンを用いて、JIS A 1107 に準じて、構造体から $\phi 50\text{mm}$ のコアを採取する。
- ②コンクリートカッターを用いて、表面から

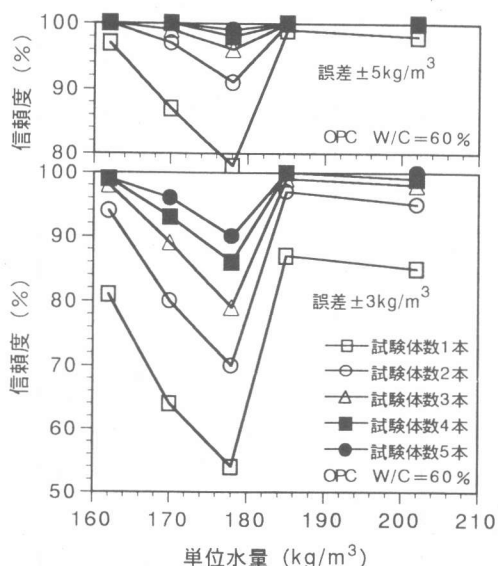


図-8 許容誤差と試験体数、信頼度の関係

50 mm 以内の部分除去し、長さ 100 mm とし、これを供試体とする。

③コアを 3 時間煮沸吸水させ、その後 21 時間 20 °C の恒温室で自然冷却し、水中質量及び表乾質量を測定する。

④コアを 105 °C の乾燥炉内で、7 日間乾燥させ、絶乾質量を測定する。

⑤絶乾質量を測定後、コアを 600 °C の電気炉で 6 時間加熱し、強熱減量を測定する。

⑥コンクリート 1 kg/m³ 当たりに含まれる骨材量、骨材の吸水量、骨材の強熱減量を測定する。

2. 計算

①本文中に示した式(1)～式(4)に従い、コンクリート 1 m³ における見掛けのペースト吸水量 W_{wa} (kg/m³) を求める。

②本文中に示した式(5)～式(8)に従い、コンクリート 1 m³ 当たりの結合水量 W_{cb} (kg/m³) を求める。

③単位水量 W_0 (kg/m³) を下記の実験式(11)により求めることができる。

$$W_0 \cong 0.990 \times (W_{wa} + W_{cb}) + 4.60 \quad (9)$$

備考 1 一試験の標準供試体数は、3 とする。結果は、それぞれの推定値を平均し、整数に

丸める。この時、母平均と±5 kg/m³ 以内になる信頼度は、96 % 以上である。

備考 2 使う式を整理すると、操作④を省略しても、操作⑤により質量が恒量となることが確認できれば、単位水量は求まる。

6. まとめ

本研究において、コアを用いたコンクリートの単位水量試験方法を検討した結果をまとめると、次の通りである。

- ①φ 50mm のコアを飽水させるには、3 時間煮沸後、21 時間水中内に静置させる。
- ②φ 50mm のコアを絶乾させるには、105 °C の電気炉で 7 日間加熱させる。
- ③φ 50mm のコアを強熱させるには、600 °C の電気炉で 6 時間加熱させる。
- ④コンクリート 1 m³ 当たりのペーストの吸水率と結合水量の和に及ぼす混入空気量の影響は小さく、単位水量をコンクリート 1 m³ 当たりのペーストの吸水率と結合水量の和から求める推定式を提案した。
- ⑤推定単位水量と調査上の単位水量との誤差の標準偏差は 3.9 kg/m³ であった。
- ⑥本試験方法では、供試体数が 3 以上であれば、その平均が母平均と±5 kg/m³ 以内にある信頼度は、96% 以上であった。そこで、一試験に供する標準供試体数は、3 とする。
- ⑦「コアを用いたコンクリートの単位水量試験方法」を提案した。

【参考文献】

- 1) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率, 細孔構造の不均質性, 日本建築学会構造系論文集, 第 509 号, pp.9-11, 1998
- 2) 中田善久, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 硬化コンクリートの単位セメント量判定試験方法に関する研究 (グルコン酸ナトリウムによる試験方法の確立), 日本建築学会構造系論文集, 第 460 号, pp.1-10, 1994