

論文

[1023] フレッシュコンクリートの単位水量の早期迅速試験法に関する研究

正会員 豊福俊泰 (日本道路公団大阪管理局)

正会員 吉岡博幸 (日本道路公団試験所)

1. まえがき

コンクリートの品質管理 (QC) および検査の合理化のためには、「荷おろし箇所で、即座にかつ簡易に品質判定できる試験方法の確立が不可欠」であるが、現状では実用化されておらず、コンクリートのQC技術の発展が望まれている。これまで多くの早期品質判定方法が提案されたにもかかわらず、何れも実用化されていない原因を鑑みると、試験に要する手数と経費、試験の迅速性不足、さらには試験の精度不足が障害となっている<sup>1)</sup>。

筆者らは、コンクリートの施工管理手法の研究、特に、自動計量記録値の活用、フレッシュコンクリートの単位水量の早期迅速試験法の開発、締固め程度判定方法の開発などを重点的に進めてきた<sup>2)~4)</sup>。本研究は、これらのうち単位水量の試験方法の検討を進め、新しい試験方法として提案するものである。

2. 試験概要

(1) 試験方法

単位水量の測定法としては、フライパンによる乾燥法、電子レンジによる乾燥法等<sup>5)~9)</sup>が提案されているが、取り扱いが簡単でかつ迅速で精度の良い判定法は現状ではない。これに対し、考案した試験方法は、RI (ラジオアイソトープ) 計器による方法 (以下、RI法という) および比熱容量の大きい加熱媒体を用いた乾燥器による方法 (以下、乾燥法という) である。要求性能としては、サンプリングによるばらつきを小さくするため、試料重量として  $\Phi 10 \times 20\text{cm}$  の強度試験用供試体重量に相当する 4kg 以上を、1回で短時間に測定できる試験装置とした。

a) RI法

試験装置は図-1に示すとおりであり、単位水量試験に加えて空気量試験 (JIS A 1128) を行うことができる点が特徴である。試験方法は、試験日ごとに、あらかじめコンクリートが入っていない蓋を外した空の状態を容器を試験装置にセットして1回1分間で合計10回計数率を測定し、その平均値を標準体計数率  $N_{s,n}$  として求めておく。次に、空気量試験と同様の方法でコンクリート試料 (約15kg) を容器に入れ、蓋を外した状態で試験装置にセットし、1回1分間で合計5回計数率を測定しその平均値  $N_n$  を求め、計数率比  $R_n$  ( $N_n / N_{s,n}$ ) を算出する。単位水量は、この値を較正式にあてはめて算出する。

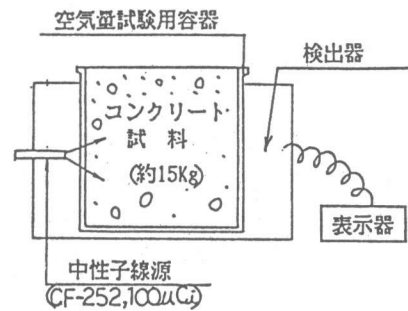


図-1 RI法試験装置

較正式は、コンクリートの全水量  $W_T$  と絶乾重量を更に強熱減量分  $\rho_{m1}$  と残留分  $\rho_{a1}$  に分け、この3つを目的変数とし、計数率比  $R_n$  との関係重回帰分析により求める。

$$R_n = a + bW_T + c\rho_{m1} + d\rho_{a1} \quad \text{または} \quad \ln R_n = a + bW_T + c\rho_{m1} + d\rho_{a1} \quad (1)$$

ここで、 $R_n$ : 中性子計数率比      a, b, c, d: 定数

$W_T$ : 全水量で、空気量補正したコンクリート単位容積当たりの水量 $W'$ と骨材の吸水量 $W_Q$ の和( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$$W_T = W' + \frac{Q_s}{100 + Q_s} S' + \frac{Q_G}{100 + Q_G} G'$$

$\rho_{mi}$ : 空気量補正したコンクリート単位容積当たりの骨材の強熱減量重量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ , 110~800℃)

$$\rho_{mi} = \frac{100}{100 + Q_s} \cdot \frac{igl_s}{100} S' + \frac{100}{100 + Q_G} \cdot \frac{igl_G}{100} G'$$

$\rho_{di}$ : 空気量補正したコンクリート単位容積当たりのコンクリートの強熱減量残分量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$$\rho_{di} = \frac{100}{100 + Q_s} \cdot \frac{100 - igl_s}{100} S' + \frac{100}{100 + Q_G} \cdot \frac{100 - igl_G}{100} G' + \frac{100 - igl_C}{100} C'$$

$Q_s, Q_G$ : JIS A 1109, JIS A 1110による細骨材、粗骨材の吸水率 (%)

$igl_s, igl_G, igl_C$ : JIS R 5202による細骨材、粗骨材、セメントの強熱減量 (%)

$W', C', S', G'$ : 空気量補正した単位水量 $W$ 、単位セメント $C$ 、単位細骨材量 $S$ 、単位粗骨材量 $G$ の修正単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。細骨材を例に示すと、次式で算出する。

$$S' = S \times (100 - A) / (100 - A_0)$$

$S$ : 配合計算時の細骨材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$A$ : 配合計算時の空気量 (%)。ここでは、 $A = 4.0\%$ 。

$A_0$ : 空気量試験による空気量 (%)

単位水量の算出法は、実測した計数率比を以上の較正式にあてはめ、全水量 $W_T$ さらに単位水量を計算する。この計算は、試験装置にマイコンを組み込むことにより、データ処理される。

$$W = W_T - \left( \frac{Q_s}{100 + Q_s} S' + \frac{Q_G}{100 + Q_G} G' \right) \quad (2)$$

#### b) 乾燥法

試験装置は図-2に示すとおりであり、試料収納体の底面積は約 $3000\text{cm}^2$ である。

試験方法は、コンクリート試料 (約5 kg) を容器に均一に敷きならし、試料重量 $M_w$ を計量後、あらかじめ400℃程度の定温に蓄熱されている試験装置に入れ、蓄熱層を容器に密着させる。この試料を、約

160~190℃の試料温度 (温度センサで確認) になるまで、または約15分間の一定時間 (ここでは、15分間とした) 加熱して、乾燥状態とし、乾燥後の試料重量 $M_D$ を計量する。乾燥前後の試料重量差から含水率 $w'$ を算出し、この値とコンクリートの単位容積質量 $U$ とを、較正式にあてはめて全水量 $W_T$ を求め、骨材吸水量を差し引いて単位水量 $W$ を算出する。

較正式は、本急速乾燥試験法が、 $W, C, S, G, Q_s, Q_G$ から求めた基準含水率 $w_0'$ に適合するように、使用骨材ごとにあらかじめ試験により求めておくものとする。

$$W_{T0} = \alpha + \beta \cdot W_T' = \alpha + \beta \cdot U \cdot w' / 100 \quad (3)$$

ここで、 $W_{T0}$ : 配合計算時の全水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ 。以後、理論値と呼ぶ)

$W_T'$ : 全水量の試験値 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  $W_T' = U \cdot w' / 100$

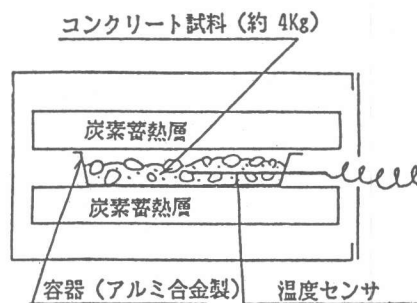


図-2 乾燥法試験装置

$\alpha$  : 定数 (kg/m<sup>3</sup>)、 $\beta$  : 定数 (kg/m<sup>3</sup>)

U : コンクリートの単位容積質量 (kg/m<sup>3</sup>)  $U = W' + C' + S' + G'$

w' : コンクリートの含水率 (%)  $w' = 100 \cdot (M_w - M_D) / M_w$

M<sub>w</sub> : 乾燥前の試料重量 (kg/m<sup>3</sup>)、M<sub>D</sub> : 乾燥後の試料重量 (kg/m<sup>3</sup>)

w<sub>0</sub>' : 基準含水率 (%)

$$w_0' = \frac{W + Q_s \cdot S + Q_G \cdot G}{C + W + S + G}$$

単位水量Wは、w'の測定値w<sub>1</sub>'を同様の方法で求め、次式にあてはめて全水量W<sub>T</sub>を計算し、前述の(2)式により算出する。

$$W_T = \alpha + \beta \cdot U \cdot w_1' / 100 \quad (4)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$  : (3)式で求めた定数

### (2) 配合条件および使用材料

R I法の実用性を検証するために行った試験の配合条件は、表-1に示す185配合である。配合要因として、フレッシュコンクリートの単位水量測定に影響を及ぼすと考えられる単位セメント量(240~360kg/m<sup>3</sup>の5種類)、単位水量(100~200kg/m<sup>3</sup>の10種類)、細骨材率(43.3~52.1%の5種類)、セメントの種類(3種類)、細骨材の種類(10種類)および粗骨材の種類(12種類)に着目した。セメントおよび骨材の品質試験結果を、それぞれ表-2、表-3に示す。また、空気量は4.0%とし、混和剤はA

E減水剤を使用した。なお、単位水量試験は、コンクリートの練り上がり後10分間経過して測定を開始し、スランブ試験と空気量試験も同時に行った。

表-2 セメントの品質試験結果

記号	比重 (-)	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結		安定性	圧 縮 強 さ (kgf/cm <sup>2</sup> )				酸化 率 (%)	三酸化 硫黄 (%)	強熱 減量 (%)
			始 発 (h-min)	始 発 (h-min)		1日	3日	7日	28日			
N H B	3.18	3210	2-31	3-36	良 良 良	-	148	261	424	1.4	2.0	1.0
	3.14	4320	1-58	3-00			127	276	486	1.6	3.2	1.2
	3.04	3920	3-10	4-33			-	124	206	427	3.5	2.1

注) 乾燥法は下線部のみ

表-1 コンクリートの配合条件

配合の組み合わせ			材 料 の 組 み 合 わ せ		
C (kg/m <sup>3</sup> )	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材の種類	粗骨材の種類	セメントの種類
300	48.5	100, 120, 140	<u>S<sub>1</sub></u> S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> ~S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub>	E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>4</sub> , E <sub>5</sub> , E <sub>6</sub> ~E <sub>12</sub> E <sub>1</sub>	N
		150, 170	<u>S<sub>1</sub></u> S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> ~S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub>	E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>4</sub> , E <sub>5</sub> , E <sub>6</sub> ~E <sub>12</sub> E <sub>1</sub>	
		160	<u>S<sub>1</sub></u> S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> ~S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub>	E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub> , E <sub>4</sub> , E <sub>5</sub> <sup>*</sup> , E <sub>6</sub> ~E <sub>12</sub> E <sub>1</sub>	
	52.1	180, 200	<u>S<sub>1</sub></u> S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> ~S <sub>7</sub> , S <sub>8</sub> , S <sub>9</sub> , S <sub>10</sub>	E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>4</sub> , E <sub>5</sub> , E <sub>6</sub> ~E <sub>12</sub> E <sub>1</sub>	H, B
	48.5	100, 120, 130, 140	S <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	
	45.3	150, 160, 170			
52.1	180, 190, 200				
240 270 300* 330 360	47.3 45.3 45.3 45.3 43.3	160	<u>S<sub>1</sub></u>	E <sub>1</sub>	N

注) \* : 重複水準 骨材の記号: 表-2参照。  
下線部: 乾燥法の配合条件(36配合)で、R I法はこれらを含む全配合条件(185配合)  
N: 普通ポルトランドセメント、H: 早強ポルトランドセメント、B: 高炉セメントB種

表-3 骨材の品質試験結果

区分	記号	種類	産地	粗粒率	比重	吸水率	単位容積質量	実積率	igloss
				(-)	(-)	(%)	(kg/l)	(%)	(%)
細骨材	S1	川砂	栃木県鬼怒川	2.85	2.58	2.41	1.68	66.6	1.21
	S2	川砂	長野県梓川	2.94	2.60	1.76	1.715	67.1	1.74
	S3	海砂	広島県瀬戸町	2.63	2.52	2.58	1.44	58.4	0.92
	S4	陸砂	青森県十和田市	2.35	2.61	3.82	1.61	64.0	1.08
	S5	砕砂	群馬県下仁田町	3.09	2.64	3.64	1.545	60.6	1.58
	S6	山砂	京都府城陽市	2.77	2.55	2.03	1.595	63.8	0.75
	S7	海砂	広島県木江町沖	2.41	2.52	2.40	1.485	60.3	1.41
	S8	砕砂	埼玉県寄居町	2.86	2.65	1.01	1.74	66.3	1.55
	S9	陸砂	北海道深川市	2.60	2.58	2.70	1.64	65.3	1.84
	S10	海砂	佐賀県唐津市	2.61	2.57	1.94	1.525	60.5	1.23
粗骨材	G1	砕石	埼玉県南神村	6.59	2.70	0.588	1.56	58.4	2.24
	G2	川砂利	長野県梓川	7.00	2.65	0.892	1.72	65.3	1.54
	K3	川砂利	長野県梓川	7.79	2.66	0.680	1.64	62.1	1.17
	G4	砕石	広島県広島市	6.68	2.70	0.481	1.58	59.0	1.06
	G5	砕石	宮城県白石市	7.11	2.70	1.52	1.56	58.5	0.63
	G6	陸砂利	群馬県藤岡市	6.88	2.70	1.53	1.64	61.5	2.15
	G7	山砂利	京都府城陽市	6.82	2.60	1.04	1.66	64.7	0.65
	G8	砕石	愛媛県土居町	6.75	2.62	0.866	1.60	61.6	1.61
	G9	砕石	栃木県葛生町	6.80	2.74	0.709	1.68	61.6	1.50
	G10	川砂利	北海道旭川市	6.91	2.65	1.66	1.68	64.3	2.27
	G11	砕石	長崎県川棚町	6.60	2.63	2.20	1.54	59.6	1.10
	G12	陸砂利	富山県入善町	6.73	2.70	1.14	1.67	62.6	1.10

注) 乾燥法は下線部のみ

乾燥法については、表-1のう下線部の36配合を配合条件とした。配合要因は、単位セメント量(240~360kg/m<sup>3</sup>の5種類)、単位水量(100~200kg/m<sup>3</sup>の8種類)、細骨材率(43.3~52.1%の5種類)、セメントの種類(1種類)、細骨材の種類(3種類)および粗骨材の種類(2種類)である。

### 3. 試験結果および考察

#### (1) RI法について

##### a) 較正式

表-4は、全骨材およびセメントの種類を含めた場合のR<sub>N</sub>と理論値の関係を、(1)式から重回帰分析により求めたものであり、何れも危険率1%で有意の高度の相関があるが、KORのモデルが最も相関が高い関係が得られた。この場合の較正式は次のとおりであり、単位水量の理論値と測定値との関係を図-3に示す(下段の( )内はt値)。

$$R_n = \{4437.42 - 4.8141 \cdot \rho_m - 6.91647 \cdot \rho_{m1} - 0.597578 \cdot \rho_{a1}\} \times 10^{-4} \quad (5)$$

(-32.27)      (-19.32)      (-8.97)

理論値と測定値との残差は、+15.4~-12.6kg/m<sup>3</sup>の範囲にあり、データ数155のうち理論値の±5kg/m<sup>3</sup>の範囲内に95の測定値(全体の61%)、±10kg/m<sup>3</sup>の範囲内に125の測定値(全体の81%)が分布している。配合や骨材の品質が測定精度に及ぼす影響は、較正式で強熱減量分と残留分の補正を行うことにより、問題ないと考えられる。

##### b) 骨材品質の影響

図-3の関係を骨材種類別に比較すると、何れも高度の相関関係が認められるが、理論値と測定値との差が比較的大きい骨材は、粗骨材G<sub>1</sub>をベースに細骨材S<sub>1</sub>、S<sub>4</sub>、S<sub>5</sub>、S<sub>9</sub>を組み合わせたも

表-4 水分密度の重相関係数と残差の標準偏差

帰帰モデル	重相関係数	残差の標準偏差 (kg/m <sup>3</sup> )
(-)		
KOR	0.961	5.987
KIR	0.961	6.015
KOR	0.959	6.163
KIL	0.959	6.192
TOR	0.957	6.711
TIR	0.957	6.751
TOL	0.957	6.820
TIL	0.956	6.861

注) K:空気量の補正による密度を用いる  
 T:単位容積質量からの密度を用いる  
 O:セメントの強熱減量を全て0とみなす  
 I:セメントの強熱減量を考慮に入れる  
 R:中性子計数率比の線形式を用いる  
 L:中性子計数率比の対数形式を用いる

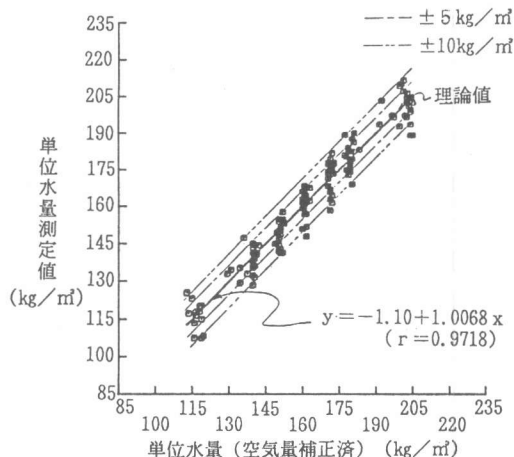


図-3 単位水量の理論値と測定値との関係 (RI法)

の、細骨材 $s_1$ をベースに粗骨材 $g_2, g_8, g_{10}$ を組み合わせたもの等が挙げられ、概して吸水率または強熱減量が大きい骨材が使用された場合に、誤差が大きくなる傾向が認められる。

一方、骨材種類の理論値に対する各測定値の分布をみると、粗骨材 $g_1$ をベースに細骨材を変えた場合は、概して+側 ( $s_2, s_3, s_4, s_6, s_9$ )、または±両側 ( $s_1, s_5$ ) に分布するものが多く、また細骨材 $s_1$ をベースに粗骨材を変化させた場合は-側 ( $g_2, g_6, g_8, g_{10}$ ) または±両側 ( $g_4, g_5, g_7, g_{12}$ ) に分布するものが多い傾向が認められ、骨材の種類ごとに回帰式が幾分異なる結果を示した。したがって、あらかじめ使用する骨材ごとに計数率比と理論値との較正式を作成(補正)することによって、さらに測定精度を向上させることが出来るものと考えられる。

### c) セメントの影響

何れのセメントを用いた場合も、ほぼ同様の傾向が認められ、セメントの種類による影響は殆ど無いものと考えられる。

### d) 単位セメント量の影響

単位セメント量 $240\sim 300\text{kg/m}^3$ の範囲では測定水量にほとんど差がないが、単位セメント量 $300\text{kg/m}^3$ 以上では幾分測定水量が小さくなる傾向が認められた。しかし、その差は少なく単位セメント量の相違による影響は考慮しなくて良いものとみなされる。

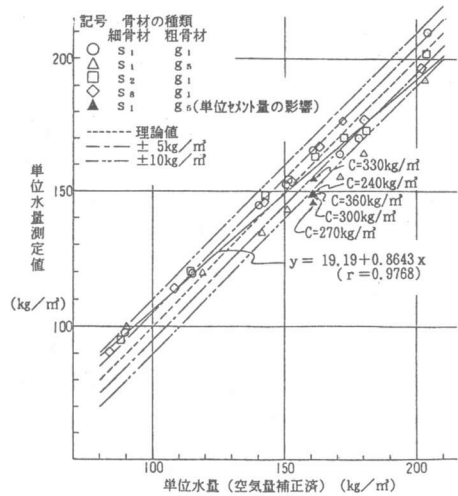
### e) 経過時間の影響

セメントの水和反応は、時間の経過と共に進んでいくのでこの影響を検討するために、コンクリートの練り上がり10分後から90分まで各経過時間において単位水量を測定した結果、測定値と理論値との差は $+2.9\sim 4.2\text{kg/m}^3$ の範囲であり、経時変化の影響と考えられる差は認められない。

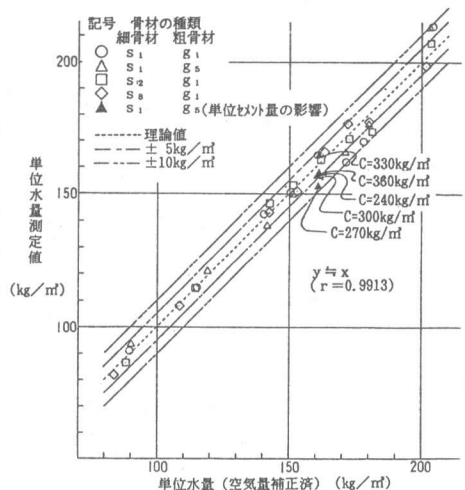
## (2) 乾燥法について

### a) 較正式

図-4 b)は、単位水量の測定値と理論値との関係であるが、危険率1%で有意の高度の相関が認められる。測定値と理論値との残差は、 $+12.0\sim -14.6\text{kg/m}^3$ の範囲にあり、データ数36のうち理論値の $\pm 5\text{kg/m}^3$ の範囲内に22(全体の61%)、 $\pm 10\text{kg/m}^3$ の範囲内に32(全体の89%)が分布している(残差の標準偏差 $6.3\text{kg/m}^3$ )。これを骨材ごとに求めた較正式を用いず測定値のままの場合(同図a))でみると、理論値 $150\text{kg/m}^3$ 付近を境に単位水量の多い領域では-側に、少ない領域では+側に分布する傾向を示している。この原因は、コンクリートの単位水量や骨材の種類にかかわらず、乾燥時間を15分と一定にしているため、これらの相違によってコンクリート中の水分の蒸発や $110^\circ\text{C}$ 以上で逸散する水分量が



a) 測定値のままの場合



b) 骨材毎に求めた回帰式を使用した場合

図-4 乾燥法の理論値と測定値との関係

異なるためである。また、試料温度約160~190℃で含水率がほぼ定量となる傾向が認められた。

#### b) 骨材品質の影響

図-4の関係を骨材種類別に比較すると、4種類とも危険率1%で高度の相関関係が認められる。しかし、理論値に対する分布幅は、粗骨材 $g_1$ をベースに細骨材 $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ を組み合わせたものは $\pm 10\text{kg/m}^3$ 以内に全て分布していたのに対し、粗骨材 $g_1$ および $g_5$ をベースとした組み合わせの場合には、較正式の勾配が理論式( $y=x$ )と異なる傾向を示している。このため、単位水量の試験方法としては、前述のように、あらかじめ使用する骨材ごとに理論値と測定値との較正式を作成する方法を採用することによって、測定精度を向上させることとした。

#### c) 単位セメント量の影響

単位水量 $160\text{kg/m}^3$ の配合で検討した結果、測定値は何れの単位セメント量においても、理論値に対して一側を示し、その差は $-5.9\sim-14.6\text{kg/m}^3$ であるが、単位セメント量を変化させたことによる顕著な傾向は認められない。あらかじめ求めた骨材別の回帰式を用いて、測定値から単位水量を算出すると、理論値との残差は $+4\sim-7\text{kg/m}^3$ となった。

#### d) 経過時間の影響

単位水量 $160\text{kg/m}^3$ の配合で検討した結果、コンクリートの練り上がり10分後から90分まで各経過時間において、30分以後時間の経過と共に理論値より小さくなる傾向が認められ、セメントの水和の影響が生じてくるものとみなされる。

### 4. まとめ

本試験の結果をまとめると、以下のとおりである。

① RI法は、単位水量と空気量の測定を同一の容器と試料を使用し、連続して試験できる。測定時間が約8分と短時間(空気量測定を含まず)であり、本試験の標準偏差は、強熱減量分や残留分の補正を行うことにより、 $\pm 6.0\text{kg/m}^3$ である。また、電源設備は予め充電しておけば不用であり、比較的試験装置が軽い(本体30kg、保存ケース30kg)ため、屋外での測定に有効である。

② 乾燥法は、測定時間約20分であり、本試験の標準偏差は、単位セメント量の影響を考慮すれば $\pm 6.3\text{kg/m}^3$ 程度であり、試料重量が5kg程度でも試料採取による誤差は小さいと考えられる。電源は200Vの設備が必要であり、蓄熱層の温度を400℃にするために、2時間程度必要である。

以上の結果より、RI法および乾燥法による試験法は、フレッシュコンクリートの単位水量を迅速に測定できる試験方法として実用可能なものと提案する。特に、自動計量記録記録値によるQC<sup>1)</sup>を併用することにより、簡易に単位セメント量等の配合を確認すると共に、今までブラックボックスとされていた、単位水量を荷おろし箇所において打込み前に確認することが可能となり、コンクリートのQCおよび検査を合理的に改善できるものとする。

#### 参考文献

- 1) 豊福俊泰：荷おろし箇所即座に品質判定が不可欠=発注の立場から=、月刊生コンクリート、Vol.7, No.11, 1988年11月、pp.23~26
- 2) 豊福俊泰・古賀文俊・吉岡博幸・高橋隆：フレッシュコンクリートのワーカビリティ判定手法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、9-1、1987年6月、pp.487~492
- 3) 豊福俊泰・吉岡博幸・高橋隆：コンクリートの単位水量管理に関する研究、第17回日本道路会議特定課題論文集、1987年10月、pp.229~231
- 4) 豊福俊泰・吉岡博幸・高橋隆：ラジオアイソトープによるフレッシュコンクリートの品質判定方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、10-2、1988年6月、pp.337~342
- 5) 土木学会：コンクリートの品質管理試験方法、1974年9月
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート品質の早期判定指針、1985年3月
- 7) 日本建築学会：コンクリートの早期迅速試験方法集、1985年5月
- 8)、9) 笠井芳夫：早期迅速試験方法の総合的な動向、清水昭之：単位水量の測定方法についていづれも月刊生コンクリート、Vol.7, No.11, 1988年11月、pp.54~66、pp.72~78