

## 論 文

[1060] ラジオアイソトープによるフレッシュコンクリートの  
品質判定法に関する研究

正会員 ○ 豊福 俊泰 (日本道路公団試験所)

正会員 吉岡 博幸 (日本道路公団試験所)

高橋 隆 (日本道路公団試験所)

1. はじめに

コンクリートの品質管理を行う上で特に重要なことは、打込み前にコンクリートの品質を判定するとともに、打込み後直ちに施工（締固め）が適切かどうかを判定することである。すなわち、フレッシュコンクリートの段階で出来るだけ短時間に精度よく単位水量や締固め程度を測定し品質判定を行うことが重要である。フレッシュコンクリートの品質判定法については、各種の方法が提案されている。しかし、取扱いが簡便でしかも迅速で精度のよい判定法はなく、その確立が急務である。

そこで本研究では、ラジオアイソトープ（放射性同位元素、以下「R I」という。）を用いた中性子水分計と $\gamma$ 線密度計によりフレッシュコンクリートの単位水量測定と密度測定を行い、その品質判定・施工評価への適用を検討した。<sup>1)</sup>

2. R I の応用原理<sup>2)~5)</sup>

R I の工業技術への応用は、大量の放射線源を利用する放射線化学、食品照射、医療器具・医薬品の滅菌などのほか、密封された微量の線源を利用する各種の計測や製品管理など幅広い分野に及んでいる。R I 計測は、利用目的に応じて、X線、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、中性子線などの放射線と物質との相互作用を利用したものである。厚さ計、レベル計、水分計、密度計など放射線の吸収・散乱を利用するものや、放射線による透過撮影を行うラジオグラフィーなどへの応用例がある。日本道路公団では、昭和62年4月より盛土の締固め管理にR I 密度計・水分計を用いている。

2. 1 中性子水分計

中性子水分計は、水素の原子核との衝突による速中性子の減速能が他の元素とのそれよりも大きいことを利用したものである。速中性子が減速されてできる熱中性子の量、あるいは熱中性子にならずに残っている速中性子の量から物質の水素原子核の密度が推定できる。このままでは水分計ではなく水素計ということになるが、水素がほとんど水の構成元素として存在している物質の場合は水分の含有量を推定できる。線源と検出器の間に被測定物質を置いて、放射線透過に伴う速中性子の減衰を直接減衰率として測定する透過型と、線源からの放射線が被測定物質で散乱されたもののうち検出器で捕捉される熱中性子の計数で測定する散乱型とがある。また、測定する位置により表面型と挿入型に大別される。

2. 2  $\gamma$ 線密度計

$\gamma$ 線密度計は、 $\gamma$ 線と物質との相互作用のうちコンプトン散乱を利用したものである。コンプトン散乱は、 $\gamma$ 線がエネルギーの一部を電子に与えて自らは小さなエネルギーになって進行方向を変える散乱現象である。すなわち、 $\gamma$ 線が物質中を通過するのにコンプトン散乱で妨げられる度合いは、途中で出会う電子の数（電子密度）に比例することになる。また、電気的に中性なほとんどの物質の密度は電子密度に比例すると見なしてよいことから、 $\gamma$ 線の通過量から物質の密度を求めることができる。 $\gamma$ 線密度計も中性子水分計

と同様に透過型と散乱型がある。前者は線源から放射され被測定物質を透過する $\gamma$ 線を検出器で捕捉し計数で測定し、後者は線源から検出器に直接入射しないようにして被測定物質の中で散乱した $\gamma$ 線だけを捕捉し計数で測定する方式である。また、中性子水分計と同様に測定する位置により表面型と挿入型がある。

### 3. 試験概要

フレッシュコンクリートの品質判定用に今回考案した中性子水分計による単位水量測定試験（以下「単位水量試験」という。）および $\gamma$ 線密度計による密度測定試験（以下「密度試験」という。）を行い、これらの実用性を検証した。

#### 3. 1 材料および配合

使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメントを、細・粗骨材は表1に示す吸水率の相違するものそれぞれ3種類とした。空気量は4%としAE減水剤を使用した。

試験に用いた配合を表2に示す。配合要因として、フレッシュコンクリートの単位水量や密度の測定に影響を及ぼすと考えられる単位セメント量、単位水量、細骨材率、細・粗骨材の種類（吸水率）に着目した。水セメント比は33~67%、スランプは0~20cmである。

#### 3. 2 試験装置および試験方法

試験に用いた中性子水分計と $\gamma$ 線密度計は、取扱いにおいて放射線防止法等の法的規制を受けず特別な資格を必要としない100 $\mu$ Ci以下の低レベル密封線源とした。

##### （1）単位水量試験

単位水量試験装置を図1に示す。現場でのコンクリートの受入れ検査に使用することを考慮し、試料容器にフレッシュコンクリートの空気量試験(JIS A 1128)用容器を使用し、単位水量試験に加え空気量試験を行なえる点が特色である。中性子水分計は、線源にCf252(半減期2.65年)を用い線源強度が100 $\mu$ Ciの表面透過型である。

試験毎に、コンクリートが容器に入っていない空の状態で試験容器を試験装置にセットし、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積計数率N<sub>sn</sub>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を試料容器に入れ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<sub>n</sub>を求め、計数率比R<sub>n</sub>(N<sub>n</sub>/N<sub>sn</sub>)を算出し

表1 骨材の品質試験結果

種類		表乾比重	吸水率(%)	単位容積重量(Kg/l)	強熱減量(%)
細骨材	a	鹿島産陸砂	2.62	1.02	1.789
	b	大井川産川砂	2.55	2.20	1.775
	c	相模川産川砂	2.58	3.35	1.615
粗骨材	A	青海産碎石	2.66	0.55	1.534
	B	津久井産碎石	2.66	0.92	1.535
	C	華厳産碎石	2.63	1.90	1.518

注1) 粗骨材の最大寸法はいずれも20mm

注2) 強熱減量(%)は110℃絶乾重量に対する重量百分率

表2 コンクリートの配合条件

配合区分	配合番号	配合要因	単位セメント量(Kg/m <sup>3</sup> )	単位水量(Kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率(%)	細骨材種類	粗骨材種類	摘要
I	1 2 3 4 5	単位セメント量	240 270 300 330 360	155	46	A	a	●
II	6 7 8 9 10 11 13 14 15 16 17 18 19 20	単位水量	300	100 110 120 130 140 145 150 155 160 165 170 175 180 190 200	51 46 53	A	a	● *
III	21 22 23 24 25	細骨材率	300	155	36 41 46 51 56	A	a	●
IV	26 27 28	粗骨材種類	300	165	46	A B C	a	*
V	29 30 31	細骨材種類	300	165	46	A	a b c	*

注) 摘要欄の●\*印はそれぞれ同一配合

た。なお、コンクリートの練り上がり後10分間を経過して単位水量試験を行い、あわせてスランプ試験と空気量試験も行った。

### (2) 密度試験

密度試験装置は、型わく内に打込まれたコンクリートの密度測定に使用することを考慮し、図2に示す試験装置とした。 $\gamma$ 線密度計は、線源に $\text{Co}^{60}$ （半減期5.25年）を用い線源強度が $100\mu\text{Ci}$ の挿入散乱型である。

試験日毎に、水の入った別の容器のガイド管に $\gamma$ 線密度計を挿入して標準体計数率 $N_{sg}$ を求めておく。次に、図2に示す試験装置のガイド管周辺の試料容器内にコンクリートが平均に行き渡るように充填し、充填直後とテーブルバイブレータ(3000r.p.m.)により締固めた後についてそれぞれ $\gamma$ 線密度計を挿入して計数率 $N_g$ を求め、計数率比 $R_g(N_g/N_{sg})$ を算出する。標準体計数率 $N_{sg}$ および計数率 $N_g$ の測定時間および回数は、単位水量試験の場合と同じである。なお、コンクリートの実測密度は、容器内に充填したコンクリートの重量と容器内のコンクリートの天端高を測定して算出した容積とから求めた。

### 4. 試験結果と考察

#### 4. 1 単位水量試験

1回の試料量が約15Kgと充分多いことから、適切なサンプリングが行われた場合の配合の変動要因は空気量のみであると見なされる。したがって、空気量試験の結果と配合計算時の空気量(4%)とから配合単位量を補正し、全水量 $W_t$ 、強熱減量 $\rho_{mi}$ 、強熱減量残分 $\rho_{di}$ を下記式で算出した。但し、セメントの強熱減量は今回の試験では考慮しなかった。

$$W_t = W + \frac{\rho_s}{100 + \rho_s} S' + \frac{\rho_g}{100 + \rho_g} G' \quad \dots \dots (1)$$

$$\rho_{mi} = \frac{100}{100 + \rho_s} \frac{i g s}{100} S' + \frac{100}{100 + \rho_g} \frac{i g g}{100} G' \quad \dots \dots (2)$$

$$\rho_{di} = \frac{100}{100 + \rho_s} \frac{100 - i g s}{100} S' + \frac{100}{100 + \rho_g} \frac{100 - i g g}{100} G' + C' \quad \dots \dots (3)$$

ここで、

$W_t$  : 空気量補正したコンクリート単位容積当りの水量と骨材吸水量の和( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

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

$\rho_{di}$  : 空気量補正したコンクリート単位容積当りの骨材の強熱減量残分重量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_s$ 、 $\rho_g$  : 細骨材、粗骨材の吸水量(%)

$i g s$ 、 $i g g$  : 細骨材、粗骨材の強熱減量(%)

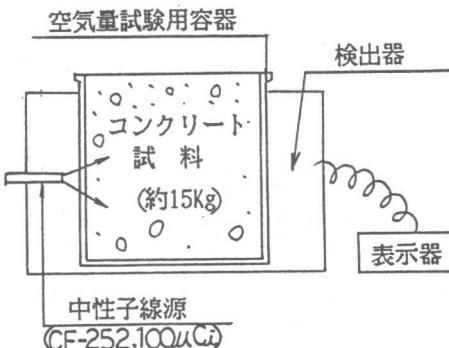


図1 単位水量試験装置

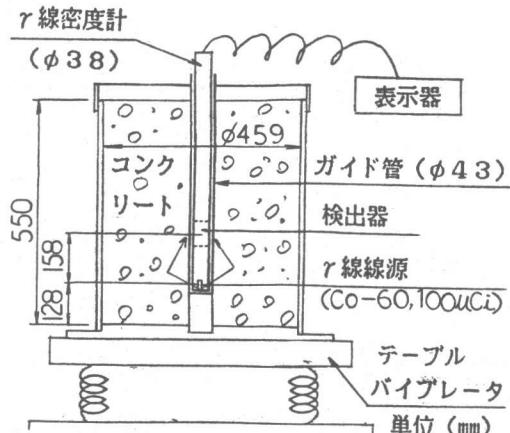


図2 密度試験装置

$W'$ 、 $C'$ 、 $S'$ 、 $G'$ ：空気量補正した水、セメント、細骨材、粗骨材の修正単位量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

細骨材を例に示すと下記式で算出する。

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

ここに、 $S$ ：細骨材の配合単位量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $A_0$ ：配合計算時の空気量(%)、 $A$ ：空気量試験による空気量(%)

最終的な目的は計数率比から単位水量(全水量)を求めることがあるが、 $R_n$  を目的変数とし  $W_t$ 、 $\rho_{mi}$ 、 $\rho_{di}$  を説明変数として重回帰分析により次式を得た。

$$R_n = (424.6 - 0.523 W_t - 0.614 \rho_{mi} - 0.049 \rho_{di}) \times 10^{-3} \quad \dots \quad (4)$$

(サンプル数  $N=27$ 、重相関係数  $R=0.990$ )

式(4)右辺の( )内第3、4項を左辺に移項し、これを有効計数率比  $R_n'$ とした。 $R_n'$  と  $W_t$  の関係を求めてこれを較正式(式(5))とする。

$$R_n' = R_n + (0.614 \rho_{mi} + 0.049 \rho_{di}) \times 10^{-3} = (424.6 - 0.523 W_t) \times 10^{-3} \quad \dots \quad (5)$$

図3は、式(5)の  $R_n'$  と  $W_t$  の関係を表わしたもので、相関の高い較正式が得られたことがわかる。

実測の計数率比から単位水量の算出は、次の手順で行った。すなわち、式(2)、(3)により  $\rho_{mi}$ 、 $\rho_{di}$  を求めこれと  $R_n$  とから式(5)により  $R_n'$  を算出する。さらに  $R_n'$  から  $W_t$  を求め、式(1)の関係より骨材吸水量を減じ単位水量を算出する。

図4は、実測した計数率比から算出した単位水量とこれに対応する単位水量  $W$  との差(残差)を表わしたものである。ほぼ  $\pm 5 \text{ kg}/\text{m}^3$  の範囲内にあり、配合や骨材の種類・品質の影響を強熱減量やその残分で補正することにより比較的良好な精度が得られ、またこの精度より空気量試験容器によるサンプリング量(約15Kg)についても問題がないものと考えられる。

図5は、セメント水和の影響を確認するため練り上がり後経過時間をおいて単位水量を測定した結果である。前述の測定精度( $\pm 5 \text{ kg}/\text{m}^3$ )を考慮するとセメント水和による影響は問題にならない。

#### 4.2 密度試験

計数率比  $R_g$  から密度(温潤密度) $\rho_t$  を求めるため、種々の回帰モデルで検討した。用いたデータは容器に充填直後で締固め前の実測データとし、締固め後のデータはブリージングや材

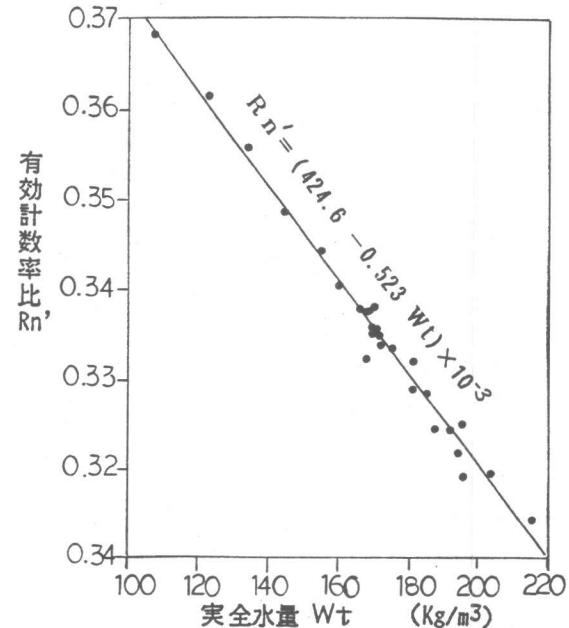


図3 有効計数率比と実全水量との関係

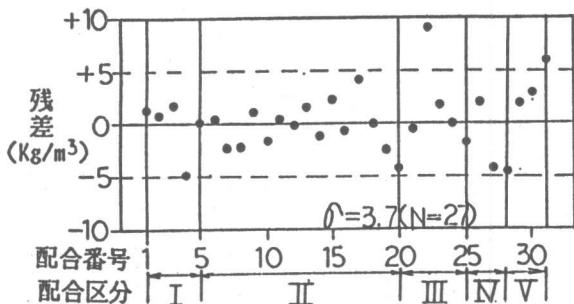


図4 単位水量試験結果による残差

料分離等でコンクリートの均一性に問題があることも考えられ対象外とした。その結果、最も簡単な一次式の下記較正式が良い回帰を示した。

$$R_g = (1038.4 - 0.1842 \rho t) \times 10^{-3} \quad \dots \dots (6)$$

(N = 27, R = 0.978)

図6は、式(6)の関係を示したものである。図7は、実測した計数率比を較正式に代入して算出した密度とこれに対応する実測密度との差

(残差)を表わしたものである。最大の残差で約95Kg/m<sup>3</sup>になるものがあるが、ほぼ±50Kg/m<sup>3</sup>の範囲にある。締固め前後の実測密度を比較すると、コンクリートのコンシステンシーによって密度変化に差が生じており、27配合中13配合(スランプ、0~6cm)が100Kg/m<sup>3</sup>以上の密度変化で残る14配合のうち9配合(スランプ、8.7~20.2cm)が50Kg/m<sup>3</sup>以下であり、硬練りコンクリートほど変化量が大きい。このことから、密度変化の小さいコンクリート(スランプ、10cm程度以上)では、±50Kg/m<sup>3</sup>の測定精度は品質判定を行う場合に若干問題がある。

## 5.まとめ

本研究で得られた結論を示すと以下のようになる。

(1) 中性子水分計を用いた単位水量試験は、空気量試験と同一の容器と試料を使用して連続して試験ができる。測定時間は試料採取を含めて約8分と短時間であり、測定精度は強熱減量やその残分の補正を行うことにより±5Kg/m<sup>3</sup>である。また、練り上がり後の経過時間によるセメント水和の影響もなく、品質管理用の実用的な試験法である。

(2)  $\gamma$ 線密度計を用いた密度測定の結果、測定精度が±50Kg/m<sup>3</sup>(±2%)と良好であり、特にスランプ5cm以下程度の硬練りコンクリートの締固

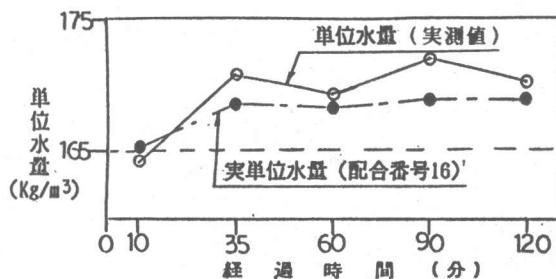


図5 経過時間による試験結果

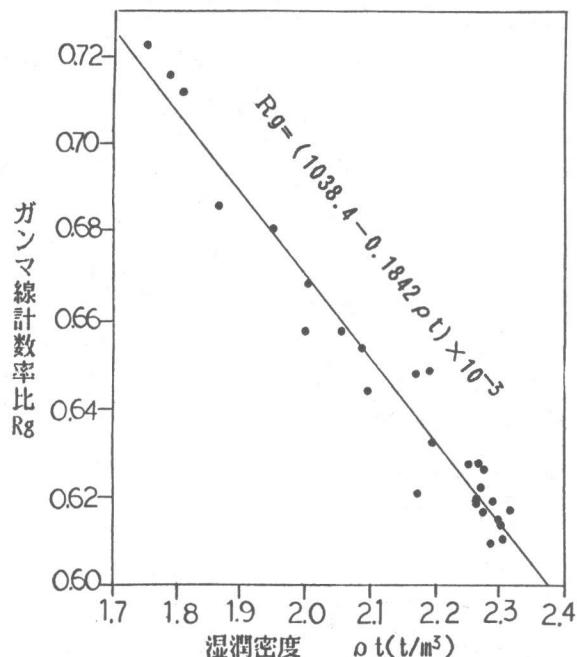


図6 ガンマ線計数率比と湿潤密度との関係

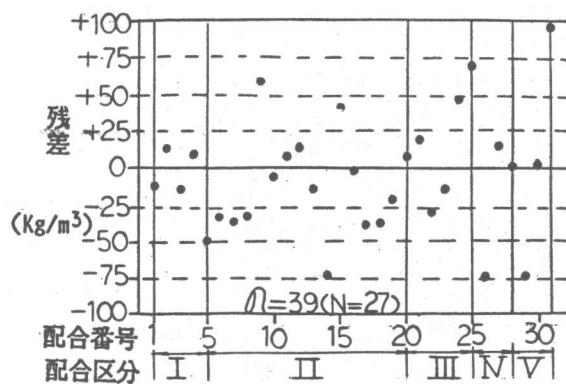


図7 密度試験結果による残差

め程度の判定に有効である。しかし、スランプ10cm程度以上のコンクリートに対しては締固め前後の密度変化が一般に小さいため、大きな欠陥部の発見には充分実用的であるが、施工（締固め）評価法としてはさらに精度の向上が必要である。

今後、さらに使用材料・配合要因などより広範囲な試料により、試験装置の較正と確認を進めてゆく予定である。

<参考文献>

- 1) 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回日本道路会議論文集、pp229～231、昭和62年11月
- 2) 松岡国太朗、山本毅史：土木分野におけるラジオアイソトープの利用、高速道路と自動車、第31巻2号、pp45～51、1988年2月
- 3) 水沼守：放射線によるコンクリートの密度及び水分の測定、コンクリート構造物の非破壊試験、日本技術検査協会、ppc-1～c-6、昭和60年7月29～30日
- 4) 山本守之：放射線を利用したコンクリートの品質管理 —— ソ連における実例 —、セメント・コンクリート、No221、pp15～19、1965年7月
- 5) 加賀秀治、山本守之：中性子水分計によるコンクリートの品質管理、セメント・コンクリート、No252、pp28～36、1968年2月