

# 論文 RI 水分・密度計によるコンクリートの単位水量測定に関する基礎的研究

渡辺 健<sup>\*1</sup>・松本 純一<sup>\*2</sup>・橋本 親典<sup>\*3</sup>・吉田 幸信<sup>\*4</sup>

**要旨**：フレッシュコンクリートの単位水量は、コンクリートの耐久性・強度などに重大な影響を及ぼす要因の一つであり、単位水量測定はフレッシュコンクリートの受け入れ時の品質管理試験として非常に重要である。そこで放射線を利用したコンクリート RI 水分・密度計を開発中であり、本研究ではプロトタイプを使用した単位水量測定について基礎的検討を行った。その結果、コンクリートに使用する骨材の岩種の違いが水分量の計測結果に影響を与える事が明らかとなった。また、コンクリートの水分量を表す近似直線が、各材料単体での計測結果より得られる近似直線と配合より推定できることが明らかとなった。

**キーワード**：RI 法，単位水量，中性子線，ガンマ線，全水量

## 1. はじめに

コンクリートのフレッシュ時の性状や硬化後の強度および耐久性に影響を及ぼす水セメント比および単位水量の管理は非常に重要な管理項目である。単位水量は、骨材の表面水率の変動による影響を受けやすいため、建設現場での品質管理検査としてコンクリート荷卸時の単位水量測定の必要性が高まっている<sup>1)</sup>。現在行われている単位水量の試験方法として、加熱乾燥法、単位容積質量法、RI (ラジオアイソトープ) 法、静電容量法、遠心分離法などさまざまな手法が挙げられる<sup>2)</sup>。

本研究では、放射線を利用した RI 法<sup>3)4)</sup>について着目した。RI 法は、コンクリート中の水分量と高速中性子線の減衰の関係を利用する方法であり、現場にてコンクリートの打設前に測定可能である新しいバッチ式の RI 水分・密度計の開発を進めている。現在、そのプロトタイプが完成しており、コンクリートの単位水量測定のための基礎的検討を行った。

## 2. RI 水分・密度計について

RI 水分・密度計は、中性子線源から放出される高いエネルギーを持つ高速中性子が水素原子と衝突することによりエネルギーの低い熱中性子の状態になる性質により水分量を、またガンマ線源から放出されるガンマ線がコンプトン効果により散乱し減少することを利用して密度を計測する装置である。本研究で用いたプロトタイプは、検出管にて試料容器中のフレッシュコンクリートを通じた熱中性子を計測し、線源の標準カウント数に対する比を計数率比として表し、校正式を用いることによりコンクリート中の単位水量を算定するものである。ここで計数率比を用いるのは、放射線源の放出する放射線の絶対数が日数の経過と共に徐々に減衰する影響をなくすためである。同様に、容器のフレッシュコンクリート中を通じたガンマ線を線源の標準カウントに対する計数率比として笑わし、校正式により密度を算定する。

装置は計器本体とスケーラー部からなり、中

\*1 徳島大学助手 工学部建設工学科 博士 (工学) (正会員)

\*2 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻

\*3 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

\*4 日本道路公団 高松技術事務所所長

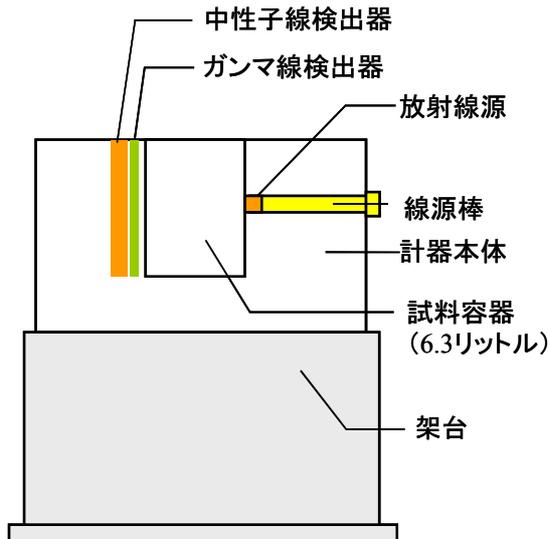


図-1 RI 水分・密度計の概略



写真-1 本体およびスケラー

中性子線源として線源強度 1.1MBq 以下の  $^{252}\text{Cf}$  (カリフォルニウム) およびコンクリートの密度を測定するためにガンマ線源として線源強度 2.59MBq 以下の  $^{137}\text{Cs}$  (セシウム) を装備している。計器の概略図を図-1 に、プロトタイプの RI 水分・密度計の写真を写真-1 に示す。

### 3. 実験概要

#### 3.1 測定方法

6.3 リットルの試料容器に試料を均等に充填し、余分な試料をストレートエッジで容器上面に均一にならし、重量を測定した後に RI 計本体に容器を据え付け、中性子計数率およびガンマ線計数率の測定を行った。RI 計では計測時に自然界に存在する放射線の影響を受けるため、自然界の放射線だけを測定し、試料を入れて計測した値から差し引く必要がある。本実験ではあらかじめ自然界の放射線を計測し、差し引いたもので計数率比を算出している。

測定は 1 試料につき 3 度行うこととし、計測した計数率比の平均値を求めた。測定時間は 1 度の測定につき 5 分とした。

#### 3.2 測定項目

本実験では、コンクリートに使用する各材料が RI 法による計測結果へ与える影響について検討するために種類の異なる細骨材と粗骨材および普通ポルトランドセメント単体での測定を行った。その後、コンクリートの製造を行い測定を行った。

#### 3.3 材料単体の計測

実験に使用した各材料を表-1 に示す。細骨材および普通ポルトランドセメントは、24 時間の炉乾燥により絶乾状態にしておいてから水道水を加えることにより試料中の全水量を約  $50 \sim 250\text{kg/m}^3$  の範囲で適宜変化させ、試料として使用した。ここで全水量とは  $1\text{m}^3$  あたりの試料に含まれている全ての水の量の合計とする。粗骨材では粒径が大きいため試料容器に充填が困難であることや試料容器内部に空隙が多くなることによる影響が考えられる。そこで、粗骨材を砕き、砕砂状にしたもので細骨材と同様の手法で測定を行うこととした。

#### 3.4 コンクリートの計測

コンクリートは表-1 に示す普通ポルトランドセメント、細骨材に川砂、粗骨材に砂岩、石灰岩、輝緑岩を使用することで、3 種類のコンクリートを製造し、測定用の試料とした。練混

表-1 使用した試料

種類	性質	
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm <sup>3</sup>	
細骨材	珪砂	密度 2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.42%
	川砂	徳島県那賀川産, 密度 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.75%
	海砂	愛媛県越智郡伯方町産, 密度 2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.94%
粗骨材	輝緑岩	高知県産, 密度 3.03g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.33% (密度 3.00g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.49%)
	砂岩	愛媛県産, 密度 2.61g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.23% (密度 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.03%)
	石灰岩	高知県産, 密度 2.68g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.47% (密度 2.67g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.37%)

※ カッコ()内の値は粗骨材を砕砂にしたもの

ぜは、セメント 5kg, 細骨材 10kg, 粗骨材 5kg と質量比を一定とし、水量を 0.6, 0.9, 1.2, 1.5kg と変化させて加えて練混ぜを行った。コンクリートの全水量は、試料容器 6.3 リットル中に含まれる全ての水量をコンクリート材料の質量比から求められる水量と骨材中に含まれる水量から求め、それを 1m<sup>3</sup> に換算することにより求めることとした。ここで細骨材および粗骨材は表乾状態で使用したが、厳密に全水量を求めるため計量時に練混ぜ用と計量用の二種類用意し、計量用を炉乾燥することで使用した骨材の含水量を求めた。

#### 4. 結果および考察

##### 4.1 材料単体での計測結果

###### (1) 細骨材およびセメント単体での結果

表-1 に示す各種細骨材および普通ポルトランドセメントの計測で得られた中性子計数率比と試料中に含まれる全水量の関係を図-2 に示す。ここで珪砂、川砂、海砂、セメントの全水量と中性子線計数率比の近似直線をそれぞれ式(1), (2), (3), (4)に示す。式中の R<sup>2</sup> は決定係数であり 1 に近いほど近似式の精度が高いことを表している。

$$y=0.0018x+0.1485 \quad R^2=0.999 \quad (1)$$

$$y=0.0017x+0.0088 \quad R^2=0.992 \quad (2)$$

$$y=0.0016x+0.1348 \quad R^2=0.997 \quad (3)$$

$$y=0.0016x+0.0913 \quad R^2=0.996 \quad (4)$$

図-2 および式(1)~(4)より、試料中の全水量

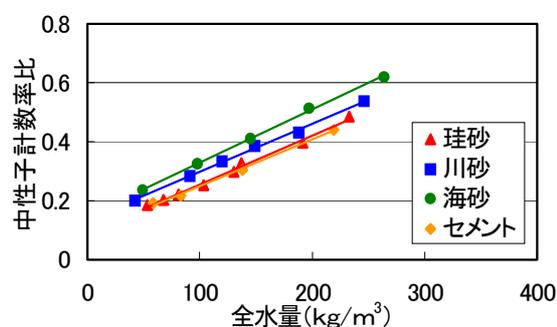


図-2 細骨材およびセメント単体での中性子線計数率比の計測結果

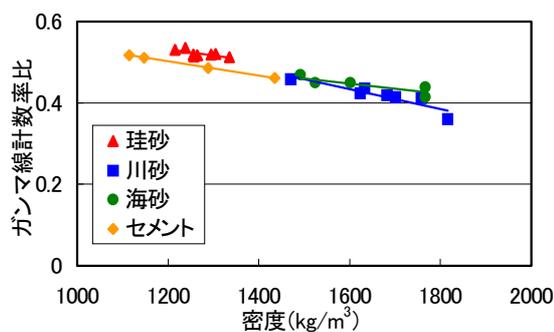


図-3 細骨材およびセメント単体でのガンマ線計数率比の計測結果

と中性子計数率比は相関関係があり、高い精度で計測されている。珪砂、川砂、海砂で比較すると骨材の違いにより同じ中性子計数率比を示していても全水量が異なることが明らかとなった。既往の研究より<sup>3)</sup>、骨材の吸水率の影響により中性子計数率比で誤差が大きくなる報告があるが、今回の実験手法では絶乾状態から水を

加えることで全水量を変化させているので吸水率の影響によるものではない。よって、本実験の範囲では海砂および川砂は、水素原子もしくは何らかの影響をもたらす因子が相対的に多く含まれていると考えられる。

次に、ガンマ線計数率比と密度の関係を図-3に示す。ここで珪砂、川砂、海砂、セメントの密度とガンマ線の近似直線をそれぞれ式(5), (6), (7), (8)に示す。

$$y = -0.00017x + 0.73 \quad R^2 = 0.646 \quad (5)$$

$$y = -0.00025x + 0.83 \quad R^2 = 0.831 \quad (6)$$

$$y = -0.00010x + 0.66 \quad R^2 = 0.754 \quad (7)$$

$$y = -0.00020x + 0.72 \quad R^2 = 0.918 \quad (8)$$

図-3 および式(5)~(8)より、細骨材の密度とガンマ線計数率比には相関があるものの、中性子計数率比より決定係数が小さくなっている。試料ごとに比較すると、セメント単体でもっとも近似直線の精度が高い。これは、骨材に比べセメントは試料容器に均一に充填されやすいためであり、ガンマ線計数率比の計測においては、試料の充填度が計数率比と密度との関係式を求める際に影響を与えると考えられる。

## (2) 粗骨材単体での結果

表-1 に示す粗骨材を砕いた砕砂で計測した中性子計数率比と含まれる全水量の関係を図-4に示す。ここで輝緑岩砕砂、砂岩砕砂、石灰岩砕砂の全水量と中性子線計数率比の近似直線をそれぞれ式(9), (10), (11)に示す。

$$y = 0.0015x + 0.2170 \quad R^2 = 0.975 \quad (9)$$

$$y = 0.0018x + 0.1031 \quad R^2 = 0.998 \quad (10)$$

$$y = 0.0019x + 0.0737 \quad R^2 = 0.998 \quad (11)$$

図-4 および式(9)~(11)より試料中の全水量と中性子計数率比は強い相関関係を示しており、式(1)から(4)に示す細骨材の近似直線とほぼ同様の傾きをもつことが分かる。輝緑岩砕砂、砂岩砕砂、石灰岩砕砂で比較すると、輝緑岩のみが異なった傾向をもっており、水素原子もしくは何らかの影響をもたらす因子が輝緑岩に多く存在することを示している。本実験の範囲において、細骨材および粗骨材の岩種の違いが同一

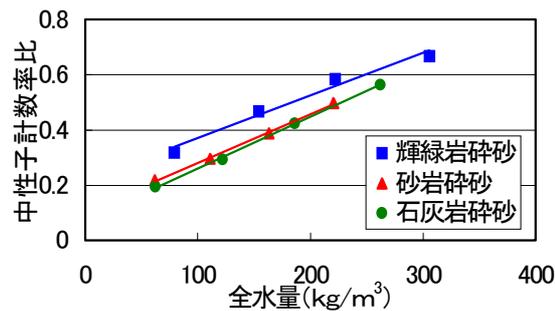


図-4 粗骨材砕砂単体の  
中性子線計数率比計測結果

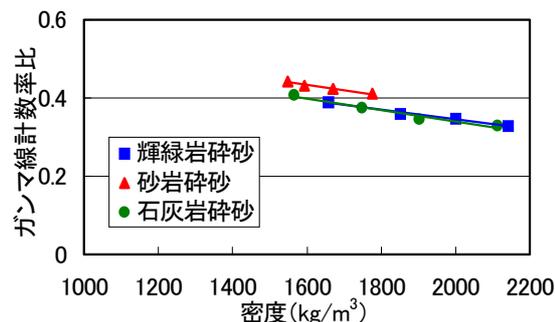


図-5 粗骨材砕砂単体での  
ガンマ線計数率比計測結果

の全水量であっても中性子計数率比の値に影響を及ぼすことが明らかになった。

次に、ガンマ線計数率比と密度の関係を図-5に示す。ここで輝緑岩、砂岩、石灰岩砕砂の密度とガンマ線計数率比の近似直線をそれぞれ式(12), (13), (14)に示す。

$$y = -0.00012x + 0.59 \quad R^2 = 0.985 \quad (12)$$

$$y = -0.00013x + 0.65 \quad R^2 = 0.974 \quad (13)$$

$$y = -0.00015x + 0.63 \quad R^2 = 0.960 \quad (14)$$

図-5 および式(12), (13), (14)より、粗骨材砕砂の密度とガンマ線計数率比の近似直線は、式(5), (6), (7), (8)に示す細骨材の結果より精度が高いことが分かる。これは粗骨材砕砂の試料容器への充填がほぼ一定に行われたためと考えられる。

## 4.2 コンクリートでの計測結果

製造した3種類のコンクリートの中性子計数率比と含まれる全水量の関係を図-6に示す。コンクリート中の全水量は、練り混ぜに使用し

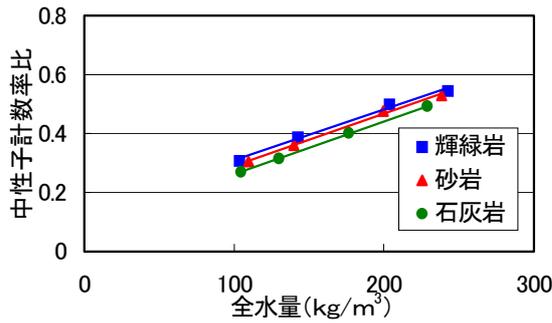


図-6 コンクリートでの  
中性子線計数率比計測結果

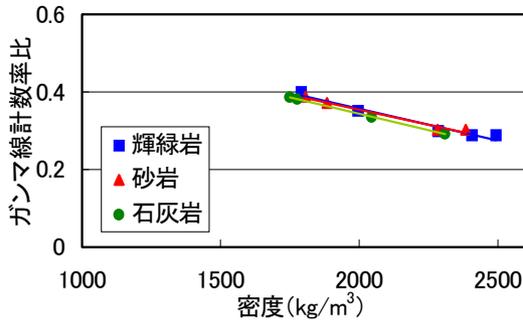


図-7 コンクリートでの  
ガンマ線計数率比計測結果

た水と骨材の実測した含水量を加えたものである。ここで粗骨材として粗骨材別の近似直線をそれぞれ式(15), (16), (17), に示す。

$$y=0.0017x+0.1351 \quad R^2=0.990 \quad (15)$$

$$y=0.0018x+0.1142 \quad R^2=0.996 \quad (16)$$

$$y=0.0018x+0.0825 \quad R^2=1.000 \quad (17)$$

図-6 および式(15)~(17)より、コンクリート中の全水量と中性子計数率比は、骨材での試験と同様に強い相関関係を示している。また、岩種の異なる粗骨材を用いたことにより、傾きはほぼ同じものの、切片が異なる近似直線が得られた。これは骨材単体での試験結果と同様の傾向を示しており、コンクリートを用いた計測でも岩種の違いが中性子計数率比の計測に影響を与えることが確認された。

次に、ガンマ線計数率比と輝緑岩、砂岩、石灰岩を用いたコンクリートの密度の関係を図-7 に示す。また、輝緑岩、砂岩、石灰岩のそれぞれを用いたコンクリートの密度とガンマ線計

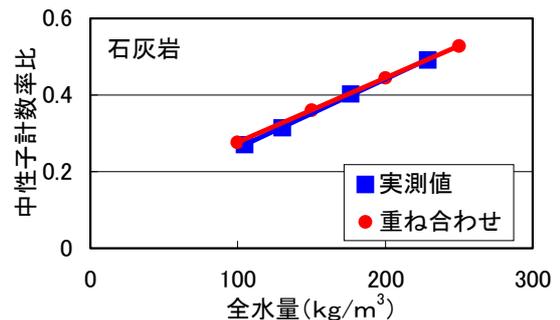
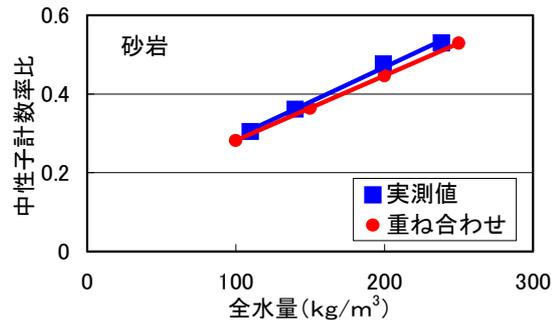
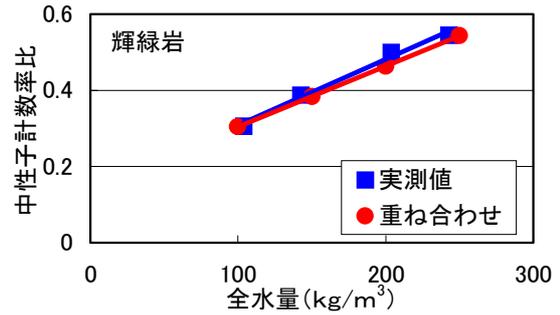


図-8 実測値の近似直線と  
重ね合わせによる直線の比較

数率比の近似直線をそれぞれ式(18), (19), (20) に示す。

$$y=-0.00012x+0.59 \quad R^2=0.985 \quad (18)$$

$$y=-0.00013x+0.65 \quad R^2=0.974 \quad (19)$$

$$y=-0.00015x+0.63 \quad R^2=0.960 \quad (20)$$

図-7 および式(18), (19), (20)より、コンクリートの密度とガンマ線計数率比は強い相関があるといえる。図-3, 図-5 に示す細骨材、粗骨材単体の結果と比較すると、単体での計測で見られた岩種の違いによる近似直線の差異はほとんど見られなかった。これは、骨材単体での計測結果とは異なり、コンクリートの試料容器への充填性が良いためであり、コンクリートで

の計測では、充填度による影響が小さくなると考えられる。

### 4.3 コンクリートの近似直線の算出

コンクリートの中性子線に対する応答は、それを構成する各材料の応答の重ね合わせで表現できると考えられる。そこで、細骨材とセメントの全水量と中性子線計数率比の関係を示す式(1)~(4)、粗骨材の全水量と中性子線計数率比の関係を示す(9)~(11)の近似直線に、全水量の値として 100, 150, 200, 250kg/m<sup>3</sup>を式中の x に代入し、中性子計数率比の値をそれぞれ算出した。それらの値にコンクリートの全質量を 1 とした際の各材料の質量比をかけて合計したものをプロットし、コンクリートの全水量と中性子計数率比の関係を表す直線を得た。この直線をコンクリートの実測値より得られた近似直線である式(15), (16), (17)と比較した。図-8 に各種コンクリートでの実測値の近似直線および重ね合わせにより求められた直線を示す。また、重ね合わせから求められた中性子計数率比と全水量の関係を式(21), (22), (23)に示す。重ね合わせによる近似直線の式は骨材単体の近似直線から得られた値より求めたものであるため、決定係数 R<sup>2</sup>は 1 となる。

$$y=0.0016x+0.1445 \quad R^2=1.000 \quad (21)$$

$$y=0.0017x+0.1160 \quad R^2=1.000 \quad (22)$$

$$y=0.0017x+0.1087 \quad R^2=1.000 \quad (23)$$

図-8 より、各岩種別のコンクリート実測値の近似直線と重ね合わせから算出される中性子係数比を示す直線はほぼ一致している。このことより、コンクリートの単位水量を推定する校正式を導く場合、実測値の値のみでなく、使用材料単体での校正式が得られていれば理論的にコンクリートの校正式を導き出すことができることが明らかとなった。

## 5. まとめ

本研究では、コンクリートの打ち込み前にコンクリートの単位水量を計測するためのバッチ式の RI 水分・密度計の開発を進めており、作製

したプロトタイプによりコンクリートの単位水量測定のための基礎的検討を行った結果を(1)~(3)に示す。

(1)コンクリートに使用する材料単体において、中性子計数率比と材料に含まれる全水量は直線式により高い精度で近似できるが、その直線は岩種の違いにより影響を受ける。

(2)ガンマ線計数率比と密度の関係は、骨材単体の計測では試料容器への充填度による影響を受けるが、コンクリートでは充填性が良いためその影響は小さくなる。

(3)材料単体で得られた中性子計数率比と全水量の関係を表す近似直線を重ね合わせるにより、コンクリートと全水量の関係を表す近似直線を導き出すことができた。

## 謝辞

本研究は日本道路公団高松技術事務所との共同研究として行われたものであり、ここに感謝の意を表します。また、実験の実施に際してご助力を得ました(株)建設材料試験所の吉川敏明氏に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 建設省, 運輸省, 農林水産省: 土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言, 2000.
- 2) 片平 博: フレッシュコンクリートの単位水量, コンクリート工学, Vol.39, No.5, pp.64-67, 2001.
- 3) 豊福俊泰, 吉岡博幸: 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, コンクリート工学年次論文報告集, vol.11, No.1, pp.153-158, 1989.
- 4) 瀬古繁喜, 田村博, 鈴木一雄, 熊原義文: RI 水分計による単位水量連続測定方法に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.2, pp.343-348, 2000.