

論文 中性子水分計によるフレッシュコンクリートの単位水量測定方法に関する検討

氏家 勲^{*1}・岡田 拓也^{*2}・柿平 将次^{*3}・有井 一晃^{*4}

要旨：中性子水分計によるフレッシュコンクリートの単位水量の推定方法においては校正曲線を適切に設定することがその精度を確保する上で最も重要である。本研究では散乱型中性子水分計を用いて、測定条件と校正曲線の設定方法について検討した。散乱型中性子水分計では測定容器内の水分量が同じでも、混合する材料の粒度分布により中性子計数が異なることが分かり、測定対象のコンクリートに使用される細骨材を用いて校正曲線を与えることを提案した。そして、提案した方法による校正曲線を用いてフレッシュコンクリートの単位水量の評価を行い、良い精度で推定することができた。

キーワード：単位水量，中性子水分計，校正曲線，フレッシュコンクリート

1. はじめに

コンクリートの単位水量はフレッシュコンクリートのワーカビリティだけではなく、硬化後の強度や耐久性などの基本的品質に影響を及ぼす配合要因である。このため、国土交通省ではレディーミクストコンクリートの品質を確保するためにフレッシュコンクリートの単位水量を現場で測定することの通知を出した。ただし、その通知において、単位水量の管理値については示されているが、測定方法については特定していない。

フレッシュコンクリートの単位水量の測定方法には、加熱乾燥法、単位容積質量法、RI法、静電容量法、遠心分離法、濃度法およびガス発生法が提案されているが¹⁾、測定精度、測定時間や測定の手間と費用など、解決すべき問題が残されている。本研究では正確で迅速かつ簡便であるという特長を有する中性子線源を利用する中性子水分計による測定方法²⁾³⁾に着目した。中性子水分計による方法では単位水量の測定に関わる誤差要因が測定機器・プロセスに関わる誤

差、特に校正曲線に関わる誤差が測定精度に係する主要因として報告されている⁴⁾。本研究は散乱型中性子水分計を用いてフレッシュコンクリートの単位水量を計測するための測定条件および校正曲線の設定方法について検討を行い、得られた校正曲線を用いてコンクリートの単位水量の評価を行い、その適用性について検討したものである。

2. 中性子水分計について

中性子水分計の測定原理は次のとおりである。中性子線は物質中の原子核との衝突に伴う吸収や散乱を繰り返しながらエネルギーが減少し熱中性子に変化する。衝突によるエネルギーの減少は原子核の質量が中性子に近いほど大きく、すなわち水素原子が最も中性子のエネルギーを減速させる元素である。従って、中性子は水素原子に特異的に反応して約18回の衝突で熱中性子に変わり、熱中性子の数は対象物質中の水素の数に比例することから、この熱中性子を選択的に検出する比例計数管で測定することにより、

*1 愛媛大学 工学部環境建設工学科助教授 博士(工学) (正会員)

*2 愛媛大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻

*3 住重試験検査株式会社 放射線利用技術部

*4 住重試験検査株式会社 検査エンジニアリング部

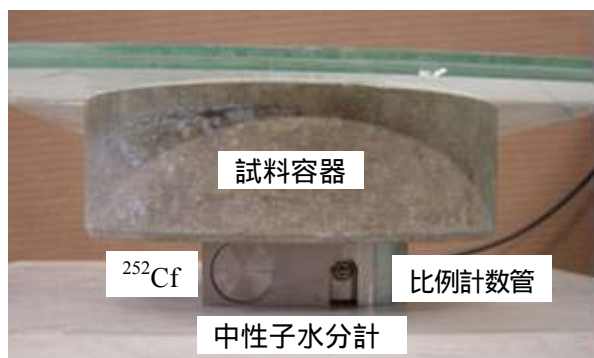


図-1 計測状況

結果的に水分量を測定することが可能となる⁵⁾。

本研究で用いた中性子線源は線源強度 3.7MBq、半減期 2.64 年のカリフォルニウム-252 (^{252}Cf) であり、平均エネルギー 2~3MeV の高速中性子を発生する。また、比例計数管は ϕ 50mm×25mm のパンケーキタイプで、内部に熱中性子に高感度であるヘリウム-3 (^3He) が封入されている。図-1 は計測状況を示す。本研究で使用した中性子水分計は中性子線源 (^{252}Cf) と比例計数管を並べて配置する散乱型で、計測用ホルダーの上に置いた容器内の試料中の水分により熱化され戻ってくる熱中性子を測定する。

3. 実験概要

中性子水分計による測定手順は測定対象試料を容器に詰めて、それを中性子線源と比例計数管をセットした計測用ホルダー上に置き、中性子計数をカウンターで測定するというもので、簡便でかつ迅速である。測定値は測定時間に関する実験以外は全て 1 試料につき 3 回(1 回の測定時間は 90 秒)測定し、その平均値を用いた。

測定条件に関する実験では、測定時間および試料容量について検討した。試料容量に関しては内径 11cm, 16cm, 20cm のポリプロピレン円筒容器と 30cm のステンレス円筒容器に水道水を加えて水の高さの増加に伴う中性子計数を測定した。なお、それぞれの容器のみで計測した中性子計数にはほとんど差はなかった。また、中性子水分計と試料との距離が計測値に及ぼす影響を調べるために、 ϕ 19.5×1cm のポリエチレン円板 1 枚を中性子水分計から所定の位置に設

表-1 使用材料

材料	種 類
セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm ³)
細骨材	砕砂 A (表乾密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 2.53%) 混合砂 (海砂:砕砂 B:砕砂 C=30:35:35) 海砂(表乾密度 2.54g/cm ³ , 吸水率 2.72%) 砕砂 B(表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 2.15%) 砕砂 C(表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 2.33%) 高炉スラグ (表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 2.31%) 豊浦珪砂 (表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 1.41%)
粗骨材	砕石 A (表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 0.88%) 砕石 B (表乾密度 2.61g/cm ³ , 吸水率 0.95%)

表-2 コンクリートの示方配合(実験室)

配合 No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
1	50	45	160	320	816	1021
2	50	45	175	350	788	985
3	50	45	190	380	760	950
4	40	45	175	438	756	945
5	65	45	175	269	817	1022
6	50	35	175	350	613	1164
7	50	55	175	350	962	806

置して中性子計数を測定した。

校正曲線の設定方法に関する実験では、内径 20.5×6cm の円筒容器(鋳物)を用いた。表-1 は実験に使用した材料を示す。表-1 に示す各材料に所定の量の水を加えて練混ぜ、試料容器に詰めて中性子計数を測定した。なお、細骨材および粗骨材は原則として表乾状態で使用した。

フレッシュコンクリートの単位水量の評価に関する実験では、実験室およびレディーミクストコンクリートプラントで製造したコンクリートを使用した。表-2 には実験室のコンクリートの示方配合を示す。実験室のコンクリートには砕砂 A と砕石 A を用い、混和剤は使用していない。なお、実験室で製造したコンクリートは本測定方法の精度を確認する目的で、練混ぜや計測の作業の際に生じる水の散逸や偏在をなるべく少なくするためバッチ量を 3ℓとした。そのため、スランプおよび空気量は計測していない。表-3 にはプラントのコンクリートの示方配合を示す。プラントでは細骨材に混合砂、粗骨材に砕石 B を用い、AE 減水剤を使用した。なお、コ

表-3 コンクリートの示方配合(プラント)

配合名	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
A	68.0	46.1	9.0	5.0	170	250	843	993
B	52.9	43.7	8.4	4.7	171	323	774	1006
C	68.0	46.5	11.4	4.2	176	259	843	977
D	68.0	48.7	18.0	4.5	191	281	855	907
E	67.9	46.8	14.5	3.9	182	268	834	954

ンクリート E は高炉セメント B 種を使用した。

4. 実験結果および考察

4.1 計測条件

図-2 は計測時間と中性子計数および変動係数の関係を示す。図-2 において、それぞれの計測時間で計測は 5 回行い、中性子計数はその平均値であり、変動係数は平均値と標準偏差から求めた。中性子計数は計測時間に比例して増加しており、単位時間当たりの中性子計数を用いれば、任意の計測時間で計測しても問題ない。しかしながら、計測時間が長くなると変動係数が

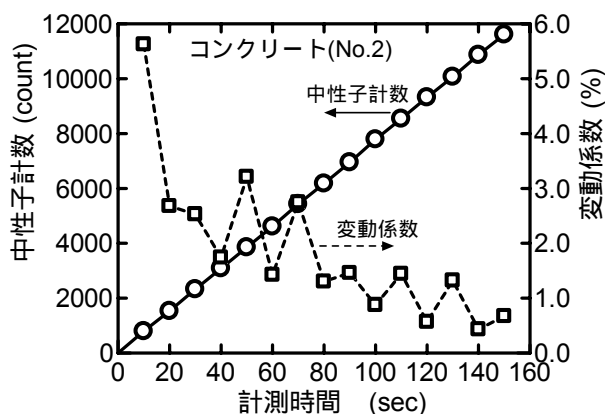


図-2 計測時間と中性子計数・変動係数の関係

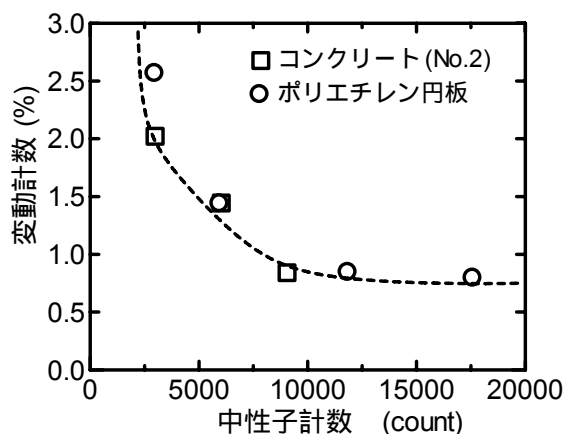


図-3 中性子計数と変動計数の関係

小さくなっている。図-3 は中性子計数と変動計数の関係を示す。コンクリート(配合 No.2)では 30, 60, 90 秒, ポリエチレン円板では 5, 10, 20, 30 秒と計測時間を変化させて、それぞれの測定において 10 回計測した。図-3 において

は中性子計数が約 8000 以上では変動係数が 1% 以下でほぼ一定となっている。中性子水分計では同じものを計測しても測定値は変動するが、測定値が大きくなると変動係数が 1% 前後となっている。従って、中性子水分計での計測時間は測定値がある程度大きな値となるよう定めるほうがよい。本研究では図-2, 3 の結果を参考にして計測時間を 90 秒とした。また、図-2 において計測 5 回の最初の 3 回での平均値と変動係数は 5 回の結果とほとんど差がなかったことから、本研究では測定回数を 3 回とした。

図-4 は直径の異なる円筒容器に水を加え、水位を 1cm ずつ高めた時の中性子計数の変化を示す。水位 0cm の場合は容器のみの状態であるが、比例計数管は熱中性子以外の放射線を計測するため、中性子計数は 0 となっていない。水位 0cm から 1cm に増加した時の中性子計数の増加割合は水位 1cm 以上での増加割合に比べて小さくなっている。これは水の層が薄い場合には中性子が通過して熱中性子に変わるための衝突に十分な厚さがないためと考えられる。さらに、直径 11cm の容器では水位 4cm 以上、その他の容器では水位 5cm 以上に水位が高くなると、中性

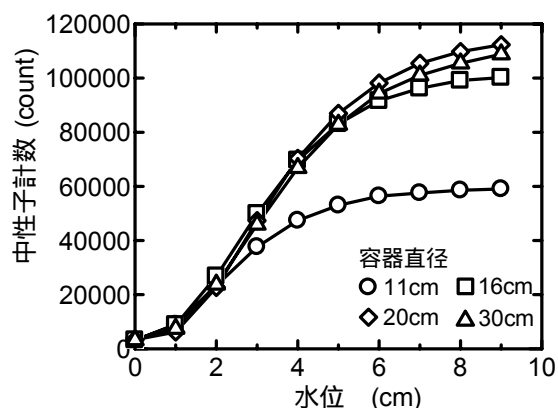


図-4 水位の増加による中性子計数の増加

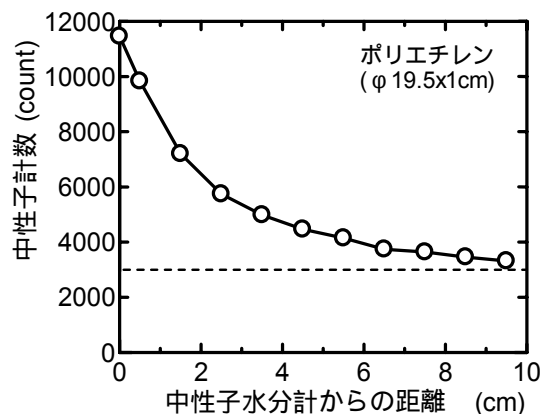


図-5 中性子水分計からの距離の影響

子計数の増加割合が低下しており，中性子水分計から測定対象物がある程度離れると関与しなくなっている。そこで，図-5 はφ19.5×1cm のポリエチレン円板を中性子水分計から上方へ段階的に移動させて計測した中性子計数を示す。図中の破線は何もない時の値である。ポリエチレンの中性子計数は中性子水分計からの距離が長くなると小さくなり，中性子水分計からの距離に依存している。さらに，図-4 で直径が 16cm 以上の容器では計測値に大きな差が見られない。これらは本研究では散乱型の中性子水分計であるため，中性子線源から水分（水素）が遠くにある場合には熱化されて戻ってくる熱中性子が減るためと考えられる。従って，試料の量を多くしても中性子計数は比例して増加しないので，以上のことを参考にして，本研究では測定試料容器を内径 20.5×6cm の円筒容器とした。

4.2 校正曲線の設定の検討

中性子水分計では中性子が水素原子に特異的に反応して熱中性子に変わり，その熱中性子の数が対象範囲中の水素の数に比例する原理から，対象物質中の水分量が測定できる。そこで，本研究では基本的には測定試料容器内の水量を適宜変化させれば校正曲線が得られると考えた。

図-6 は水単体およびセメント，細骨材，粗骨材に段階的に水を加えて混ぜ，容器に詰めて計測した結果を示す。なお，粗骨材では骨材を容器に詰めた後に水を追加しただけである。セメント，細骨材，粗骨材に関して，水を加える前の中性子計数値にはほとんど差はない。しかし

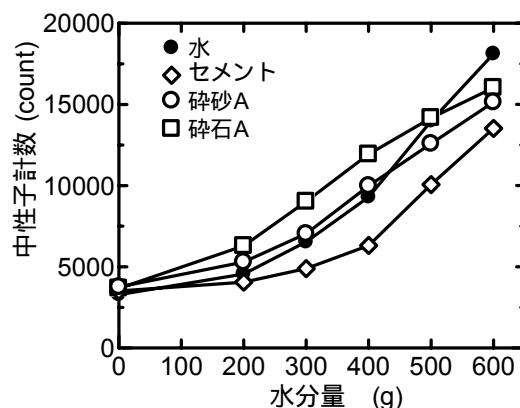


図-6 中性子計数に及ぼすコンクリート材料の違いの影響

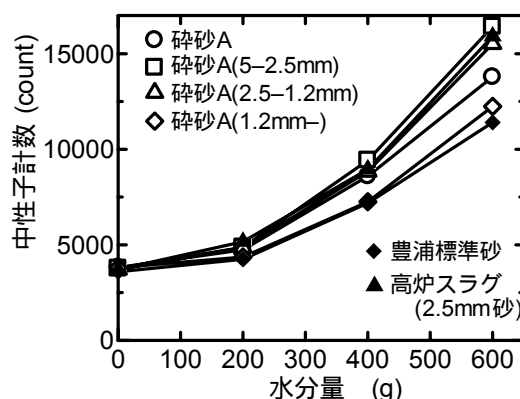


図-7 中性子計数に及ぼす細骨材の違いの影響

ながら，容器内の水量が同じであっても材料の違いによる差が見られる。水単体の場合に比べ砂利に水を加えた場合の方が中性子計数が大きくなっている。これは粗骨材があるため，同じ水量でも測定試料容器内の水位が高いためである。一方，セメントと細骨材を比較した場合，セメントの方が小さくなっている。これはセメントは細骨材より粒子が小さいので，水が容器内で細かく分散したため熱中性子に変わるための衝突が少なくなったことによると思われる。そこで，図-7 は種々の細骨材に水を加えて混ぜて測定した結果である。図には砕砂 A をふるい分けにより，2.5mm ふるいと 1.2mm ふるいに残るものおよび 1.2mm ふるいを通過したものも示している。図から分かるように，細骨材の粒子径が小さくなると同じ水量でも中性子計数は小さくなっている。また，粒径がほぼ同じであれば，細骨材の種類の違いによる差はあまり小さくなく，豊浦珪砂や高炉スラグ砂の中性子計数は同

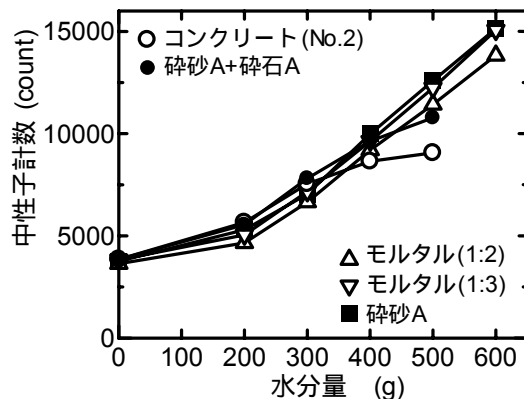


図-8 中性子計数値に及ぼす細骨材と粗骨材の混入の影響

じ粒径の砕砂とほぼ同じ値となっている。

図-8 はモルタルおよびコンクリートの水以外の材料に注水して混合した試料を用いて計測した結果を示す。図中のコンクリートおよび砕砂 A+砕石 A の各材料の割合は表-2 の配合 No.2 と対応させ、モルタルではセメント砂比を 1:2 と 1:3 としている。モルタルでは同じ水分量でも細骨材が多くなると中性子計数がやや多くなっている。一方、粗骨材が入った場合の中性子計数は水分量 300g まではモルタルより大きいが 400g 以上では逆に小さい。粗骨材が入った場合に 400g の水を加えると水が分離ぎみとなり、上部に水が多くなり容器内で水分の不均一が生じるため、中性子計数が小さくなったと考えられる。

以上のように、中性子水分計による測定では同じ水量であっても容器内での水分の分散状態により測定値が異なるので、コンクリートの配合ごとに校正曲線を定める必要があるが、煩雑となる。図-8 に示すように細骨材単体のみでも、コンクリートやモルタルと近い測定値であり、容易に校正曲線の試料が作製できることなどから、本研究では細骨材単体で得た校正曲線について検討する。図-9 は後述のコンクリートの単位水量の評価に用いた校正曲線を示す。校正曲線式は加えた水量と得られた中性子計数との関係を最小二乗法で直線回帰して得たものである。なお、 V_s は測定容器の容積で本実験では $V_s = 1.88 \text{ l}$ である。図には絶乾状態の細骨材の校正曲線も示している。絶乾状態の細骨材を用いた場

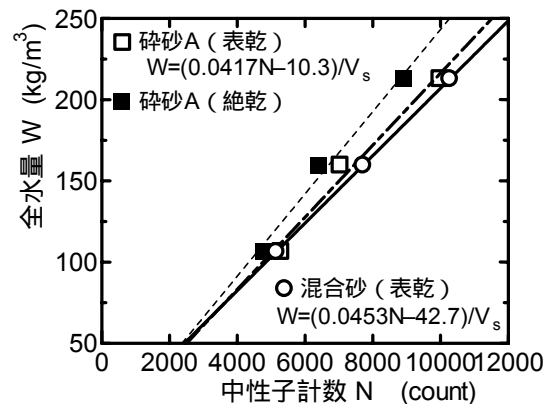


図-9 校正曲線

合に水を加える前の中性子計数は表乾状態の場合とほとんど差はなかったが、水を加えた状態での計測で、細骨材に含まれている水の影響が表れ、中性子計数が大きくなっている。また、砕砂 A と混合砂の校正曲線は近いものとなっており、両者の粒度分布がほぼ同じであるためと考えられる。しかしながら、本研究では校正曲線を得るための代表的な細骨材については検討していないので、今回は測定対象のコンクリートに使用される細骨材を表乾状態で用いて校正曲線を設定することとした。

4.3 フレッシュコンクリートの単位水量の推定

図-10 は表-2 に示した配合のコンクリートを実験室で練混ぜて、単位水量を推定した結果を示す。図中の黒塗りは No.1 の配合において単位水量だけを 15 kg/m^3 と 30 kg/m^3 増加させたものである。図-10 では実験室で細・粗骨材の表面水の

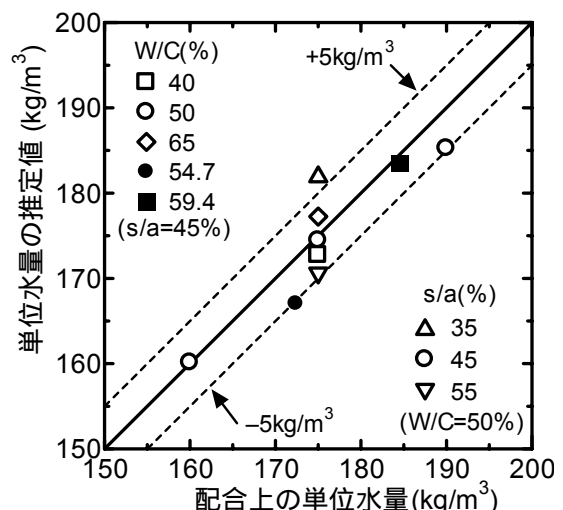


図-10 単位水量の推定結果（実験室）

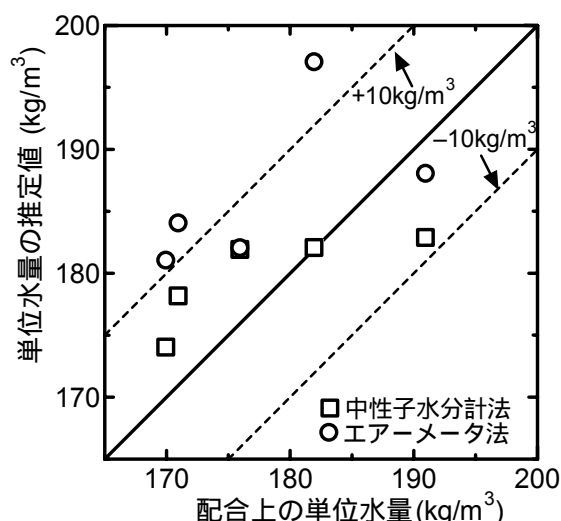


図-11 単位水量の推定結果（プラント）

管理をできるだけ厳密に行ったコンクリートに対する評価であり，推定結果は 1 つを除いて配合上の単位水量に対して $\pm 5\text{kg/m}^3$ の範囲内にあり，良い精度で推定している。ただし，細骨材による校正曲線を用いた中性子水分計による単位水量推定では単位水量が同じでも，水セメントが大きくなるとあるいは細骨材率が小さくなると，単位水量をやや多く推定する傾向が見られる。推定値が $+5\text{kg/m}^3$ 以上となっているものは，細骨材率が 35%と粗骨材量が多い No.6 の配合である。これらのことは骨材が形成する測定容器内の空間内での水の密度の違いによるものと考えられ，本研究で提案する中性子水分計法の精度を改善するための課題の一つである。

図-11 はプラントで製造したコンクリートに対する推定結果を示す。図-11 には同時に行ったエアメータ法による推定結果も示している。図-11 において，中性子水分計法では配合上の単位水量に対して $\pm 10\text{kg/m}^3$ の範囲内で推定している。また，中性子水分計法による推定値はエアメータ法による推定値と比較すると，低い値となっている。中性子水分計法による推定値で単位水量 191kg/m^3 のコンクリート D の場合のみが配合上の値に対して過小評価している。これはブリーディングが多く，測定容器内の上部に水が集まり，中性子計数の値が小さくなったためと思われる。

5. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 散乱型中性子水分計では戻ってくる熱中性子を測定することから，中性子水分計から測定対象試料がある程度離れると測定に関与しなくなる。
- (2) 測定容器内の水分量が同じであっても，混合する材料の種類によって，中性子計数の測定値は異なり，粒度が細かいものほど中性子計数は小さくなる。
- (3) 測定しようとするコンクリートに使用している細骨材を用いて校正曲線を設定する方法を提案し，その校正曲線と中性子水分計により，一般的な配合のコンクリートにおいて， $\pm 5\text{kg/m}^3$ の範囲内で単位水量を推定することができた。

今後の課題として，中性子水分計の中性子線源の強度が時間とともに減衰することによる校正曲線の経時的な変化に関する補正や骨材量の違いが中性子計数に及ぼす影響の補正がある。

参考文献

- 1) 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.64-67，2001.5
- 2) 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.153-158，1989.6
- 3) 山田雅裕ほか：中性子水分計を用いたコンクリートの単位水量測定技術の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.911-916，2003.6
- 4) 吉兼亨ほか：フレッシュコンクリートの単位水量迅速測定及び管理システム調査研究委員会報告，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.37-46，2004.6
- 5) 都立産業技術研究所：中性子線を用いた水分形，テクノ東京 21，No.109，pp.8-9，2002.