論文　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

山田　雅裕*1・森沢　友博*2・羽渕　貴士*3・吉田　慎一郎*4

要旨：単位水量を迅速かつ簡便に推定できる方法として，水分量が水素原子数に比例する原理を利用した中性子水分計を用いた方法について，各種要因が測定精度に与える影響，水分量の変動に対する測定精度，さらに現場への適用性に関して実験的検討を行った。その結果，フレッシュコンクリート中の全水量と水素原子数との間に高い相関が認められ，中性子水分計を用いて単位水量を迅速かつ簡便に推定でき，工事現場もしくはレディーミクストコンクリート工場での単位水量の迅速測定に有効な手段であることがわかった。

キーワード：中性子水分計，迅速測定，フレッシュコンクリート，単位水量

1.　はじめに

コンクリートの品質保証や耐久性の確保の観点から，打ち込み前にフレッシュコンクリートの硬化後の品質を予測することはコンクリート構造物の品質保証を行う上で重要である。そのため，耐久性や強度に密接に関係するフレッシュコンクリート中の単位水量を工事現場の荷卸し地点もしくはレディーミクストコンクリート工場にて測定し，要求品質に適合しているか否か評価するシステムの確立が望まれている。これまでに多くの単位水量測定方法が提案されているものの，測定に要する時間，操作の方法，測定の手間と費用，さらには測定の精度などの面で課題が残されているのが現状である。

そこで，著者らは各種の単位水量測定法の中でも「迅速性」,「簡便性」,「正確性」に着目し，中性子水分計（以下,「水分計」という）を用いた単位水量測定法を取り上げた[1),2),3)]。

本報は，室内実験で測定時間や操作方法について検討するとともに，水量変動に対する測定精度や各種要因が測定精度に与える影響を把握し，さらに実際出荷されるコンクリートを用いて現場実用性の検討結果をまとめたものである。

2.　中性子水分計の概要

2.1　中性子水分計の原理

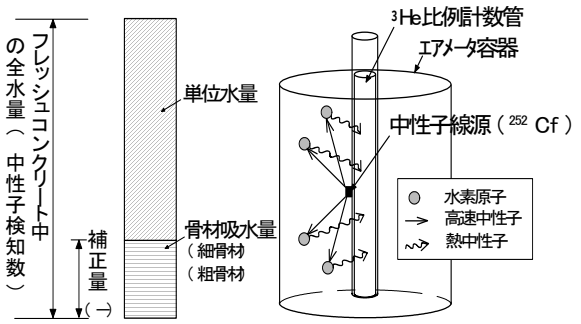
中性子水分計での測定原理を**図－1**に示す。

本水分計による単位水量の推定は，フレッシュコンクリート中の水分量と高速中性子の減衰量との関係を利用して行うものである。水分計により測定される水分量は，フレッシュコンクリート中の単位水量と骨材吸水量の合計水量（以下,「全水量」という）に相当する。

中性子線源から発生したエネルギーの高い中性子（高速中性子）は，中性子とほぼ等しい質量である水素と衝突して最も効率よくエネルギーを失い熱中性子に変化し散乱する。熱中性子の数は照射範囲に存在する水素の数に比例することから，熱中性子の数をヘリウム 3（^{3}He）比例計数管を用いて検知することで，検知された熱中性子数（以下,「中性子検知数」という）から単位水量を間接的に推定することが可能である。

なお，本水分計に使用している中性子線源はエネルギー放出量 4×10^{5}n/sec, 強度 3.4MBq（メガベクトル）のものであり，法令上の規制を受けない弱い強度のものである。

*1 東亜建設工業(株)　技術研究所　建築構造研究室　主任研究員（正会員）
*2 東亜建設工業(株)　技術研究所　材料構造研究室　研究員（正会員）
*3 東亜建設工業(株)　技術研究所　材料構造研究室　主任研究員（正会員）
*4 信幸建設(株)　土木部



図－１　中性子水分計の測定原理

2.2　測定装置

測定装置は，^{252}Cf（カルフォルニウム）の中性子線源（以下,「線源」という）と中性子検出部である ^{3}He 比例計数管（検出器）および，データ演算部である計測器で構成される。コンクリートの試料容器には現場で用意しやすいエアメータ容器（容積７Ｌ）を使用することで通常の品質管理の延長で試験できるようにした。検出器はエアメータ容器の高さとほぼ同じ長さとし，直径 30mm のステンレスパイプ内に設置した。また，線源はパイプの外周に取り付け，常にエアメータ容器の高さの中心に配置されるようにした。

なお，測定時に地盤等からの水分の影響を受けにくく，また測定ごとに水分計が中心位置へ常に設置できるように測定架台(地面から 30cm 以上離す）を使用することとした。

2.3　単位水量測定手順

本水分計による単位水量測定手順を**図－２**に示す。まず, フレッシュコンクリートを採取し，空気量を測定する（「JIS A 1128：フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」の無注水法に準拠)。空気量測定後，エアメータ容器の上蓋を外して測定架台へセットし，エアメータ容器の中心に水分計を挿入して計測する。この時の測定値は10秒間の測定を連続5回行ったときの平均値（測定時間 50 秒）とした。

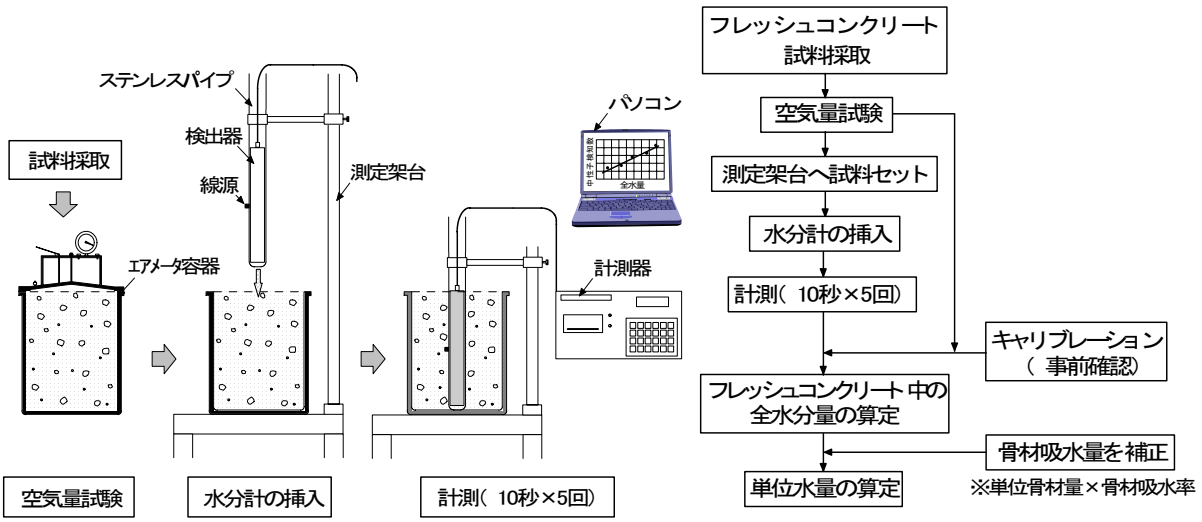
単位水量の算定にあたっては，事前に単位水量を 3～5 水準で変化させた配合でキャリブレーションを行い，全水量と中性子検知数の関係を求め校正式（回帰直線）を作成しておく。推定単位水量は，式(1)により計測した中性子検知数からフレッシュコンクリート中の全水量を算出した後，式(2)により骨材吸水量を補正して求める。

$$中性子検知数 = A \cdot 全水量 - B \qquad (1)$$

$$推定単位水量 = 全水量 - 骨材吸水量 \qquad (2)$$

ここに，A，B：実験定数

なお，校正式の精度を高めるために，実測空気量と設計空気量との差を示方配合の構成材料の構成比に基づいて再配分し，実際の単位水量に対して校正式を求めることとした。



図－２　水分計による単位水量測定手順

3.　室内実験

3.1　実験概要

本水分計を用いた単位水量測定において，測定精度に与える各種要因についての実験的検討を行った。使用材料を**表－1**に示す。実験条件の組合せは**表－2**に示す通りであり，検討項目ごとにシリーズⅠ～Ⅲに分けて実験を実施した。

表－1　使用材料

材　料	種　類
セメント C	N：普通ポルトランドセメント 密 度3.16g/cm^3
	BB：高炉セメント B 種　密 度3.04g/cm^3
細骨材 S	S1：山砂 A　密 度2.60g/cm^3，吸水率 1.54%
	S2：山砂 B　密 度2.56g/cm^3，吸水率 1.47%
	S3：陸砂　密 度2.57g/cm^3，吸水率 2.30%
	S4：砕砂　密 度2.64g/cm^3，吸水率 1.48%
粗骨材 G	G1：砕石 A　密 度2.70g/cm^3，吸水率 0.52%
	G2：砕石 B　密 度2.70g/cm^3，吸水率 0.26%
練混ぜ水	上水道水
混和剤	AE 減水剤（リグニンスルホン酸系）

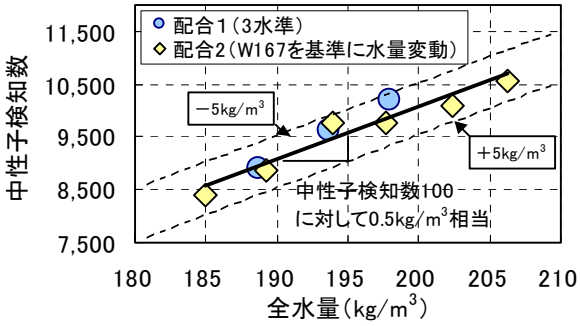
表－2　実験条件の組合せ

シリーズ	検討項目	使用材料 C	使用材料 S	使用材料 G	単位水量 (kg/m^3)
Ⅰ	水量変動に対する精度	N	S1	G1	167 172,179,185
Ⅱ	セメント種類 温度の違い 湿度の違い 練り置き時間	N BB	S2	G2	170～190 5 間隔
Ⅲ	骨材の違い 水量変動に対する精度	N	S2 S3 S4	G1 G2	170～200 5 間隔

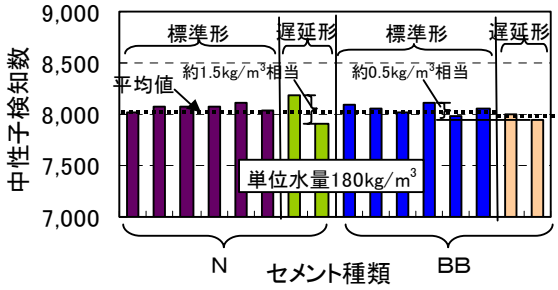
3.2　実験結果

水量変動と中性子検知数の関係を**図－3**に示す。単位水量 172，179，185kg/m^3 の 3 水準のコンクリート「配合 1」と，単位水量 167kg/m^3 に対して＋2.5～＋22.5kg/m^3 の範囲で＋5kg/m^3 づつ増加させたコンクリート「配合 2」で水量変動に対して精度を検討した結果，両者の値は±5kg/m^3 の範囲で分布し，配合が異なっても精度良く推定可能であることが確認された。中性子検知数 100 に対する単位水量は 0.5kg/m^3 程度に相当するものであった。

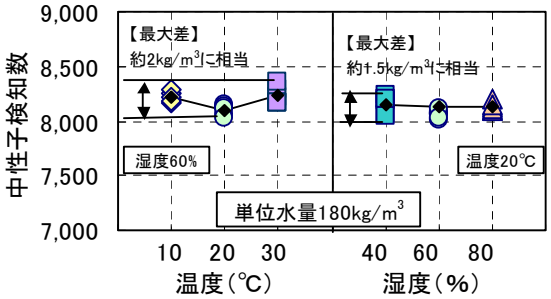
セメント種類と中性子検知数の関係を**図－4**，温度・湿度と中性子検知数の関係を**図－5**，練り置き時間と中性子検知数の関係を**図－6**に示



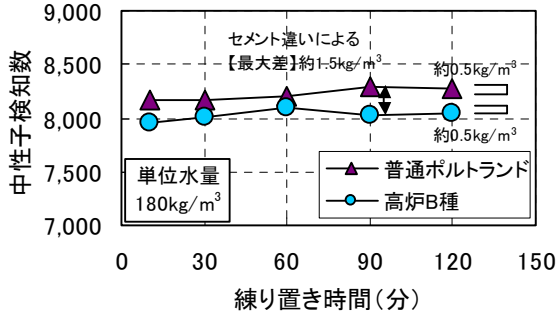
図－3　水量変動と測定精度



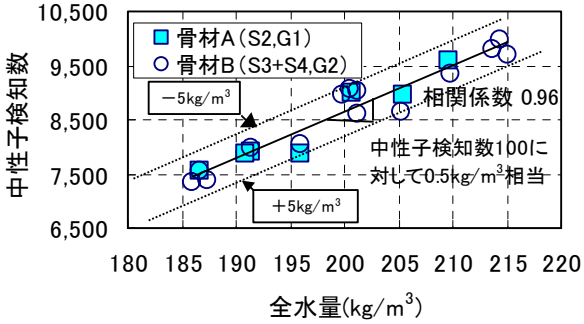
図－4　セメント種類と中性子検知数の関係



図－5　温度・湿度と中性子検知数の関係



図－6　練り置き時間と中性子検知数の関係



図－7　骨材の違いによる影響

す。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと高炉セメントB種を用いたコンクリートを比較した場合，中性子検知数の差は最大でも単位水量1.5kg/m^{3}程度に相当するものであり，セメントの違いが中性子検知数に及ぼす影響は小さいものと考えられる。環境温度および湿度の変化による中性子検知数の差は，それぞれ最大でも単位水量2kg/m^3，1.5kg/m^{3}程度に相当するものであり，環境温度や湿度の変化が中性子検知数に及ぼす影響についても少ないものと考えられる。また，練り上がりから120分までの範囲では，いずれのセメントでも最大で単位水量にして0.5kg/m^{3}程度の変化であり，練り置き時間が中性子検知数に及ぼす影響はほとんど認められなかった。骨材の違いによる影響を**図－7**に示す。骨材AはS2とG1を組合せた単位水量170～195kg/m^{3}の7配合のコンクリートであり，骨材BはS3，S4とG2を組合せた単位水量170～200kg/m^{3}の7配合のコンクリートである。両者の測定値は，全水量±5kg/ m^{3}の範囲で分布しており，今回の範囲では特に骨材の違いによる影響を受けず単位水量の推定が可能であった。なお，**図－3**と**図－4**～**図－7**の全水量に対する中性子検知数の値が異なるのは測定時期が違うためである。

4. 実施工における検証実験

4.1 事前のキャリブレーション

実施工に使用したコンクリートは単位水量158 kg/m^3，設計基準強度27N/mm^2，スランプ8cmである。使用材料を**表－3**，キャリブレーションに用いた配合を**表－4**に示す。

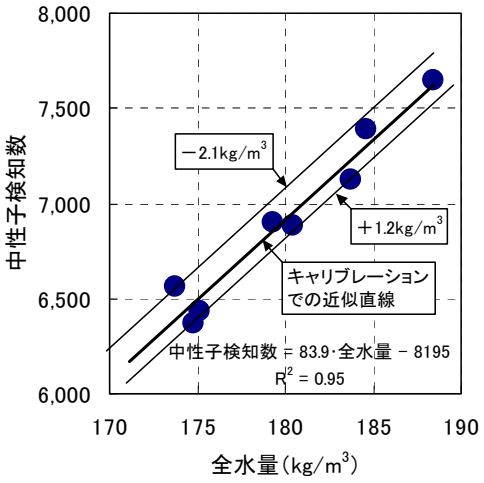
キャリブレーションは，**表－4**に示すように単位水量158 kg/m^{3}を基準として，－5kg/m^3，＋5kg/m^3，＋10kg/m^3，＋15kg/m^{3}で増減させた5配合について，施工前日に工場内で実施した。単位水量の増減分は容積が1 m^{3}となるように空気量の増減にて調整し，その他の構成材料の単位量は一定とした。なお，使用した骨材は，骨材貯蔵設備から直接採取したものとした。

表－3　使用材料

材料名	種　　類
セメント:C	高炉セメントB種　密度：3.04g/cm^3
細骨材:S	山砂 密度：2.60 g/cm^3，吸水率：1.64%
粗骨材:G	砕石 密度：2.70g/cm^3，吸水率：0.58%
水:W	上水道水
混和剤:WR	AE減水剤

表－4　キャリブレーションに用いた配合

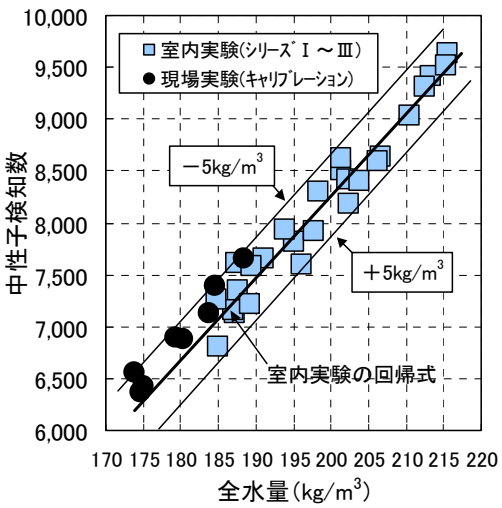
W増減 (kg/m^3)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量（kg/m^3）			
				W	C	S	G
---	4.5	52.3	42.4	158	303	770	1083
－5	5.0	50.4		153			
＋5	4.0	53.7		163			
＋10	3.5	55.4		168			
＋15	3.0	57.0		173			



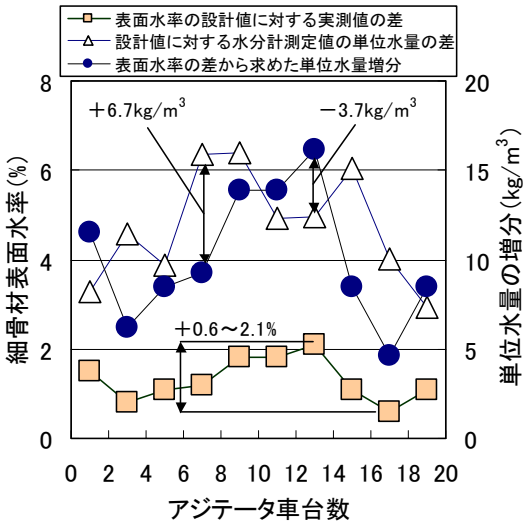
図－8　キャリブレーションの結果

練り混ぜには二軸強制練ミキサを用い，練り上がり直後と30分後でスランプ,空気量試験および本水分計による単位水量測定を実施した。

キャリブレーションの結果を**図－8**に示す。5配合の全水量と中性子検知数の関係から，実験定数がA=83.9，B=8195の回帰直線（決定係数0.95）が得られた。この回帰直線に対して，－2.1～＋1.2kg/m^{3}の範囲で精度良く全水量が測定されたことから，現場における校正式として採用した。参考までに，シリーズⅠ～Ⅲの室内実験結果と今回の実施工時のキャリブレーション結果を**図－9**に示し比較した。線源強度は時間の経過とともに減衰するため，線源固有の半減期から求まる減衰係数を乗じて，約半年前に実施した室内実験データを現時点に補正して



図－９　室内実験との比較



図－10　細骨材表面水率の変動と単位水量

比較している。その結果，室内実験で得られた全水量と中性子検知数の回帰式に対して±5 kg/m³ の範囲内に分布し，今回の実験の範囲において，実施時期および配合に係らず減衰係数を用いて補正を行うことで，同等の評価が可能であることが確認された。

4.2　現場における単位水量測定

(1)　測定方法

単位水量の測定は，出荷されたアジテータ車 20 台に対して 1 台おきに実施し，10 台についてのデータを得た。荷卸し時にアジテータ車から試料を採取し，スランプおよび空気量を測定した後，本水分計を用いた方法で単位水量測定を行った。なお，同時に高周波加熱乾燥法による単位水量測定も行った [4)]。高周波加熱乾燥法ではウェットスクリーニングしたモルタル試料 400g を高周波出力 500W の電子レンジで 20 分間乾燥し，乾燥水量から単位水量を算出した。

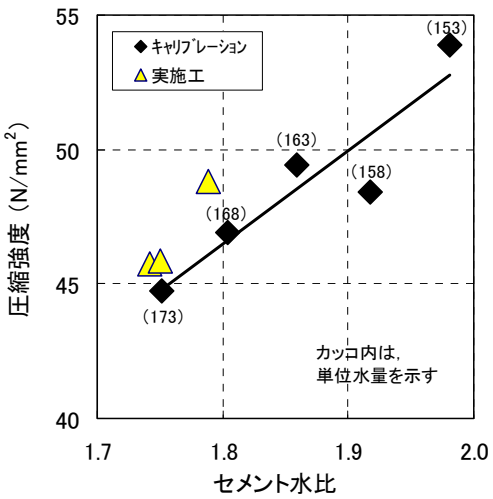
(2)　細骨材の表面水率の変動と単位水量

製造工程において，骨材がミキサに放出される途中でサンプリングした細骨材の表面水率を測定し製造時の表面水率の設定値と比較した。単位水量測定を実施した 10 台からサンプリングした。細骨材の表面水率の変動と単位水量の関係を**図－10** に示す。サンプリングした細骨材の表面水率の実測値は，設定値に比べて+0.6～+2.1%（平均+1.3%）大きく，実測値が正しいと仮定した場合，製造時の単位水量は+4.6～+16.2kg/m³（平均+10.1kg/m³）大きかったものと推測される。本水分計による推定単位水量も同様に設計値に対して，+6.8～+15.5 kg/m³（平均+11.1kg/m³）の範囲で大きい結果となった。そこで，表面水率の設定値と実測値の差が主な単位水量の増加分と考えると，この増加分と本水分計による単位水量の測定値と設計値との差は，今回の実験の範囲においては－3.7～＋6.7kg/m³ と小さいものであった。

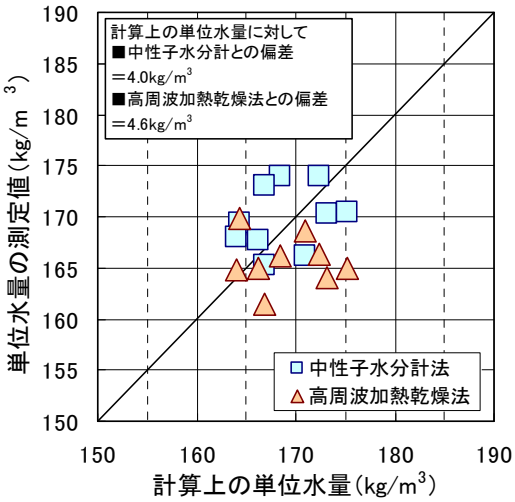
(3)　推定 C/W と圧縮強度による評価

キャリブレーションで得られた 5 点のセメント水比（C/W）と材齢 28 日における標準水中養生供試体の圧縮強度の関係を**図－11** に示す。

実施工における材齢 28 日の圧縮強度の平均値は 45.8N/mm²（n=12）であった。この結果は，キャリブレーションの結果より求めた C/W と圧縮強度の関係式から C/W=1.8 程度であり，配合上の設計単位水量より 10 kg/m³ 程度大きい値に相当する。実施工における圧縮強度の値を水分計で測定した単位水量から求まる推定 C/W で図示したが，キャリブレーションの結果より求めた関係式に対してやや安全側な評価となったものの，圧縮強度の早期予測も可能であることが確認できた。



図－11　セメント水比と圧縮強度



図－12　高周波加熱乾燥法との比較

(4)　迅速性の検証

試料を採取してから単位水量の測定終了までの時間を計測し迅速性を評価した。時間に要する時間を，a)空気量試験，b)試料セット，c)水分計による単位水量測定の 3 段階に分けると，それぞれ平均で a)2 分 30 秒，b)1 分 30 秒，c)60 秒であった。コンクリートの荷卸しから単位水量の測定終了までに要した時間はわずか 5 分程度であり，単位水量を迅速に測定できる有効な方法といえる。

(5)　高周波加熱乾燥法との比較

表面水率の実測値と設定値の差を補正して求めた計算上の単位水量に対する本水分計法と高周波加熱乾燥法との比較を**図－12** に示す。本水分計よる単位水量測定値は，高周波加熱乾燥法に比べて平均で 4.2kg/m^3 程度大きい傾向を示したものの，計算上の単位水量に対する標準偏差は，高周波加熱乾燥法よりもやや低く，本水分計は単位水量測定法として十分適用できることが確認された。

5.まとめ

中性子水分計を用いた方法で，各種誤差要因が測定結果に及ぼす影響や単位水量の推定精度ならびに測定時間について,実用性を検証した。これらの結果をまとめると以下のようになる。

(1) 中性子水分計を用いた方法は，使用材料や環境条件さらには練り置き時間などの影響を受けにくく，単位水量は実際の値に対して±5kg/m^3 の範囲で測定することが可能である。

(2) 中性子水分計による単位水量の測定に要する時間は 5 分程度であり，工事現場やレディーミクストコンクリート工場での迅速かつ簡便な単位水量測定法として有効である。

参考文献

1)　山田雅裕ほか：中性子水分計を用いた単位水量の測定に関する研究, フレッシュコンクリートの単位水量迅速測定および管理システムに関するシンポジウム論文集, pp.13-18，2002.12

2)　北澤真ほか：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計測について，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，pp.1437-1438，2002

3)　川幡栄治ほか：フレッシュコンクリート中の単位水量推定方法に関する研究(その２．中性子水分計法に関する検討)，日本建築学会学術講演梗概集（北陸），pp.953-954，2002

4)　日本建築学会：高性能 AE 減水剤コンクリートの配合・製造および施工指針・同解説，pp.130-136，1999