

論文 RI水分計を用いたポンプ配管中のコンクリートの 水量連続モニタリング

瀬古繁喜*1・田村 博*2・鈴木一雄*3・熊原義文*4

要旨：高速中性子の減衰割合とコンクリート中の水分量の関係を利用した RI(ラジオアイソトープ)水分計を試作し、ポンプ配管を通るコンクリートの単位水量を連続測定する技術の可能性について実験的な検討を行った。その結果、単位水量測定値の平均は配(調)合上の単位水量とほぼ一致した。繰返し実験したときの測定値のばらつきは小さく、測定装置には再現性があることを確認した。測定値の精度はサンプリングタイムを長くすることにより向上することが明らかとなった。

キーワード：単位水量, RI 水分計, 連続測定, 測定精度, サンプリングタイム

1. はじめに

フレッシュコンクリートの単位水量測定は、たとえば高周波加熱乾燥法¹⁾のように試料をその都度採取するバッチ方式によって行なわれている。これに対してポンプ配管中のコンクリートの単位水量を自動的に連続測定することができれば、結果が一部の試料による代表値であったり、採取・測定に手間がかかるといったバッチ方式の問題を解決することができる。そこで筆者らは、ポンプ配管中のコンクリートの水量を連続測定できる RI 水分計を試作し、その基礎的な性能についてコンクリート圧送実験によ

り評価を行った。なお、RI(ラジオアイソトープ)とは中性子等の放射線を放出して安定になる同位元素(放射性同位元素)のことを言う。

2. 連続式 RI 水分計の概要と較正式

連続式 RI 水分計は、放射線源に線源強度 0.74MBq(20 μ Ci)の ^{252}Cf を用いた高速中性子(運動エネルギーの大きい中性子)線透過型の水分計であり、線源から放出された高速中性子の減衰量が水素原子の量により変化することを原理としてコンクリート中の水分量を測定する。水分量は、コンクリート中の水素原子により熱

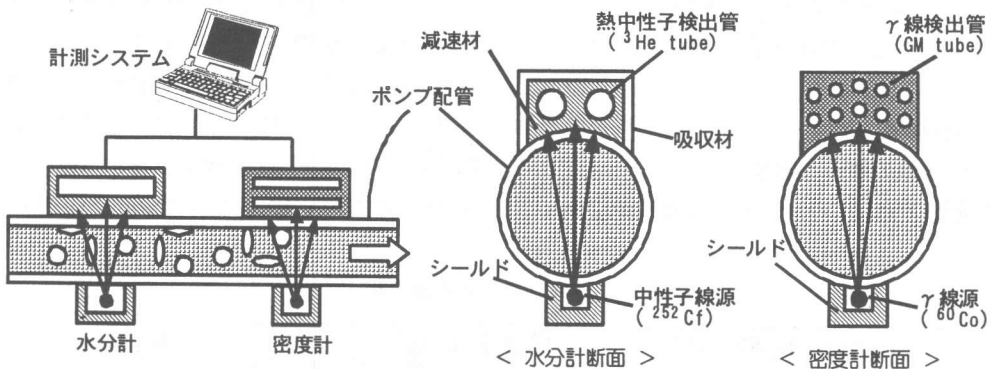


図-1 RI水分計の概要

*1(株)竹中工務店 技術研究所 生産研究開発部 工修 (正会員)
 *2(財)日本建築総合試験所 材料試験室 室長 工博 (正会員)
 *3 全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所 所長 工博 (正会員)
 *4 ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 機械部 部長

中性子(運動エネルギーの小さい中性子)に減衰されことなく透過してきた高速中性子の数を検出管でカウントし、較正式(1)により算定する。線源と検出管は図-1 に示すようにコンクリートポンプ配管の両側に相対して取り付けることにより、ポンプ配管中を流れるコンクリートの単位水量の連続測定が可能となる。本実験で用いる RI 水分計の試作機には、コンクリートの密度を測定するためにγ線密度計が併せて取り付けられている。

本実験で用いた RI 水分計の較正式(1)は、水分計から得られた RI カウント数(Nm)を用いて線源の標準カウント数(Sm)との比(計数率比)により単位水量を算定するものである。測定値の標準偏差(σ WW)は式(2)に示す形となる。

$$Nm/Sm = C \cdot \exp[D\{(WW) + \alpha(UW \cdot WW)\}] \quad (1)$$

Nm : 試料測定カウント(cpm)

Sm : 線源強度を表わす

標準 RI カウント数(cpm)

WW : 試料の単位水量(kg/m³)

UW : 試料の密度(単位容積質量)(kg/m³)

C, D, α : 較正係数

$$\sigma WW = \frac{1}{(1 - \alpha) \cdot |D|} \cdot \frac{1}{\sqrt{Nm \cdot ST}} \quad (2)$$

ST : Nm のサンプリング時間(min.)

3. 実験概要

3. 1 実験の因子と水準

本実験ではコンクリートの単位水量を、

165kg/m³ から 205kg/m³ の範囲で 10kg/m³ おきに 5 水準設定した。また、測定値の再現性について検討するために各々の調合のコンクリートを 3 回製造し、繰り返し測定した。

3. 2 使用材料とコンクリートの配(調)合

コンクリートに使用した材料を表-1 に示す。コンクリートの配(調)合は、フレッシュコンクリートのスランプ 18±2.5cm、空気量 4.5±1.5%を目標とし、単位セメント量を 350kg/m³ として試験練りにより定めた。コンクリートの配(調)合を表-2 に示す。

表-1 コンクリートの材料

種類	性質
セメント	普通ポルトランドセメント, 比重3.16
細骨材	大井川水系陸砂, 比重2.61, 吸水率1.41%
粗骨材	飯淵産砕石1505, 比重2.63, 吸水率0.71%
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物
高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸エーテルと 架橋ポリマー複合体

コンクリートの製造は、容量 100 リットルの強制練りパン型ミキサを用い、1 バッチの練り量を 100 リットルとして 1 回の実験につき 3 バッチ練り混ぜた。

3. 3 実験方法

コンクリート圧送実験に用いた装置は、スクイズ式ポンプ(最大吐出圧力 3N/mm²)から全長約 15m の配管を接続し、圧送されたコンクリートが再びポンプのホッパに戻るような循環システムとした。RI 水分計はポンプ出口から約 3m の位置に配置し、その近傍には圧力ゲージ(ダイヤフラム型、容量 0.2N/mm²)を取り付

表-2 コンクリートの配(調)合

No.	水セメント 比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤			
			水	セメント	細骨材	粗骨材	使用量 (kg/m ³)	種類		
1	58.6	42.8	205		722		—	なし		
2	55.7	43.7	195	350	748	953	0.613	AE減水剤		
3	52.9	45.1	185		774		0.875			
4	50.0	45.8	175		801		3.80		高性能	
5	47.1	46.6	165		827				5.02	AE減水剤

けた。実験装置の概観を図-2 に、RI 水分計の取付け状況を図-3 に示す。

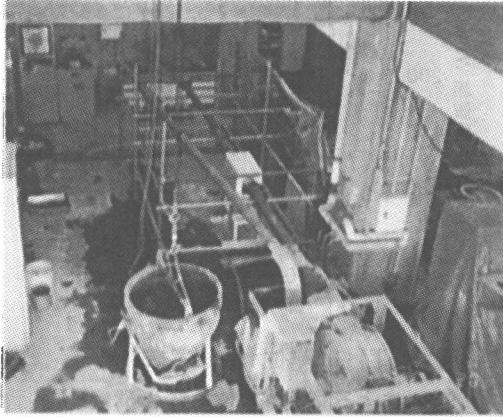


図-2 実験装置の概観

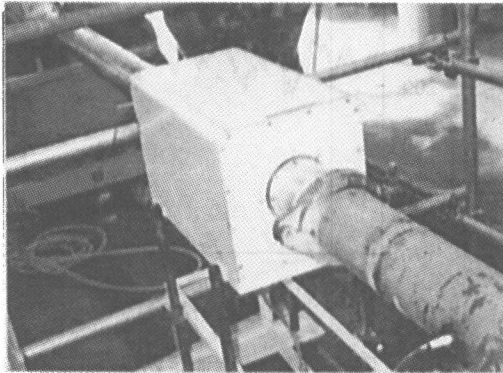


図-3 RI水分計の取付け状況

圧送時には配管内の圧力勾配が各々の配(調)合のコンクリートでほぼ一定(0.005N/mm²/m)となるように圧送速度を調整した。一回の実験では、30 分間一定の圧送速度でコンクリートを循環させて単位水量を測定した。実験の手順を図-4 に示す。コンクリートは 3 バッチに分けて製造し、練り上がった 1 バッチ目のコンクリートによりフレッシュコンクリートの性状および高周波加熱乾燥法による単位水量の確認を行った。その後 1 バッチ目のコンクリートに引き続いて、2 バッチ目、3 バッチ目のコンクリートをホッパに投入した。単位水量の連続測定を開始する前に、ロードセルを取り付けた

バケットに吐出されたコンクリートを受けて時間当たりの流量と配管内の圧力を確認した。単位水量測定の開始直後と 15 分後に筒先試料によりフレッシュコンクリートの性状を確認した。

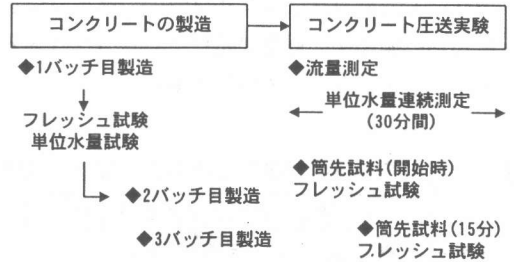


図-4 実験の手順

3. 4 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-3 に示す。練り上がり時のスランプは 17.5cm から 21.5cm の範囲であった。空気量は 3.0% から 5.6% の範囲であった。コンクリートの圧送を開始してから 15 分後の筒先試料によるスランプは、高性能 AE 減水剤を用いた場合の一部にスランプダウンが見られたほかは、ほぼ練り上がり時の性能を保持していた。空気量は圧送 15 分後には若干低下する傾向が見られた。

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

単位水量 基準値 (kg/m ³)	回数	スランプ(cm)			空気量(%)		
		練り 上がり	圧送 開始	15分 後	練り 上がり	圧送 開始	15分 後
205	1	19.5	19.5	19.0	3.2	2.6	1.8
	2	20.5	20.5	19.5	3.0	3.0	2.5
	3	20.5	19.5	20.5	4.5	4.2	3.5
195	1	21.5	19.5	20.5	4.8	3.6	2.8
	2	20.5	19.0	20.0	4.5	3.7	3.1
	3	21.0	20.5	19.5	4.9	4.2	3.5
185	1	19.5	17.5	16.0	5.4	4.6	4.0
	2	20.5	18.0	17.0	5.1	4.3	3.8
	3	20.5	18.0	17.5	5.3	3.9	3.7
175	1	19.5	16.5	12.0	4.5	3.9	4.1
	2	17.5	19.0	17.5	4.0	3.5	4.0
	3	18.5	18.0	15.0	3.9	4.0	4.0
165	1	21.0	12.5	10.5	5.6	5.2	5.6
	2	21.0	17.5	9.5	5.2	5.1	4.2

練り上がり時のフレッシュコンクリートの単位水量測定結果を表-4 に示す。測定結果の配(調)合上の単位水量に対する比は 0.98 から 1.03

の範囲にあり、フレッシュコンクリート中の単位水量はほぼ配(調)合どおり得られたとみなすことができる。なおこの結果は、電子レンジを用いた高周波加熱乾燥法によるもので、これはコンクリート試料を 5mm フルイでスクリーニングして得られたモルタル試料の、高周波による加熱乾燥前後の質量変化によりコンクリートの単位水量を算出する方法である。

表-4 高周波加熱乾燥法による単位水量測定結果

配(調)合 単位水量 (kg/m ³)	単位水量測定結果(kg/m ³)		
	実験繰り返し		
	1回目	2回目	3回目
205	201.3	204.4	205.7
195	196.2	195.0	192.5
185	186.7	187.9	186.3
175	175.7	179.4	175.3
165	170.1	168.9	—

3. 5 RI 水分計の較正係数

RI 水分計の較正計数は水分量が既知の試料を用いて決定した。本実験における較正係数は、 $C=0.9402$ 、 $D=-0.0014501$ 、 $\alpha=0.1451$ であった。

4. 実験結果と考察

4. 1 単位水量の算定方法

RI 水分計から得られたカウント数(Nm)から単位水量 WW を算定する較正式(1)では、試料の密度 UW の影響を考慮する必要がある。そのため、ここでは次に示す 2 つの方法により単位水量を算定し、密度の影響について評価した。

- (1)W1: 較正式(1)の密度 UW に γ 線密度計による測定値を直接用いて算定した単位水量
- (2)W2: 較正式(1)の密度 UW に、基準となる配(調)合から空気量がすべて圧縮されたもの(空気量が 0%)と考えて計算される一定の値を用いて算出した単位水量

サンプリングタイム(ひとつの値を算出するのに必要とする時間)120 秒のときの W1 による単位水量の測定結果を図-5 に、W2 による測定結果を図-6 に、 γ 線密度計による密度の

測定結果を図-7 に示す。

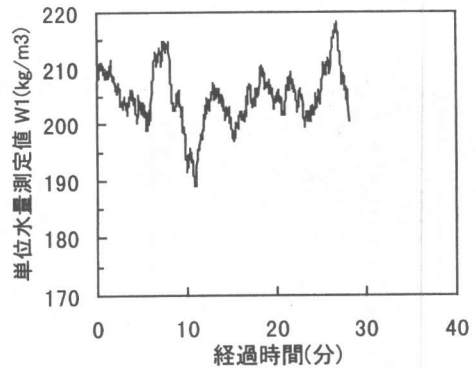


図-5 単位水量測定結果
(W1 による算定, 単位水量 205kg/m³)

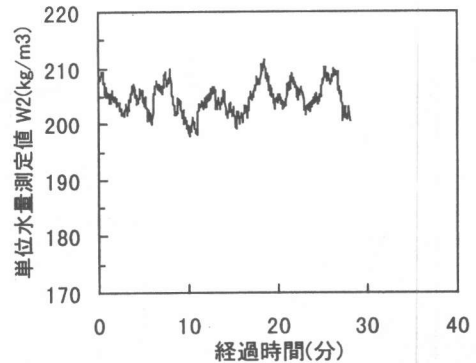


図-6 単位水量測定結果
(W2 による算定, 単位水量 205kg/m³)

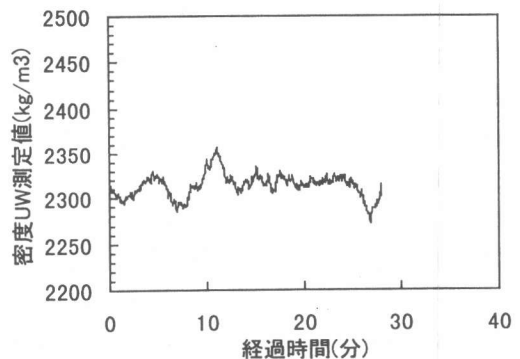


図-7 γ 線密度計による測定結果

単位水量測定結果のばらつきは、較正式(1)

の密度 UW に配(調)合から計算される一定値を用いて算定した W2 の場合が、 γ 線密度計による測定値を直接用いて算定した W1 の場合に比べて小さいことがわかる。これは、配管の中を流れるコンクリートの密度を配(調)合から計算で求めて与える以上に、密度計による測定値が大きく変動したためと思われる。

4. 2 測定値の平均と配(調)合上の単位水量

単位水量を測定した 30 分間の平均値と、基準となる配(調)合上の単位水量の関係を図-8 に示す。単位水量測定値の平均値は配(調)合上の単位水量とほぼ一致していることがわかる。また、1 水準の単位水量について 3 回の繰り返し実験を実施した場合の、測定値の平均と配(調)合上の単位水量との差は $0.3 \sim 3.6 \text{kg/m}^3$ であり、RI 水分計による測定値は再現性を有するとみなすことができる。

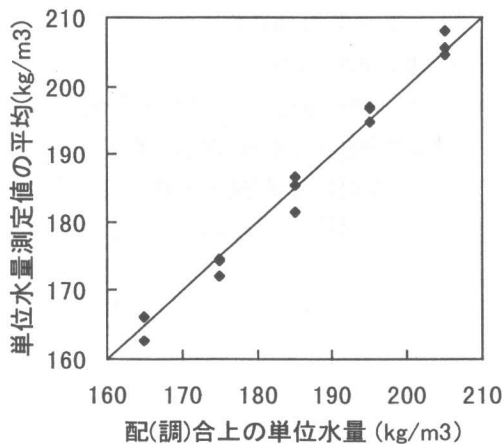


図-8 測定値の平均と配(調)合上の単位水量の関係

4. 3 測定値の変動

単位水量を 30 分間測定した結果を、サンプリングタイム(単位水量を平均して算出する時間)5 秒、10 秒、30 秒、60 秒、120 秒、180 秒、300 秒として、算出したときの単位水量測定値の標準偏差を図-9 に示す。サンプリングタイムが長いほどその平方根に反比例して測定

値の標準偏差は小さくなることがわかる。これは、RI 水分計の測定値の標準偏差は式(2)で表わされ、サンプリングタイムの平方根に反比例するためである。このことはバッチ式の RI 水分計²⁾と同様の結果である。

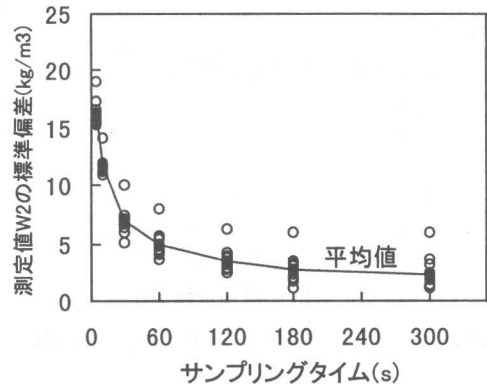


図-9 単位水量測定値 W2 の標準偏差とサンプリングタイムの関係

図-9 より、測定値の標準偏差はサンプリングタイムが 120 秒以上ではほとんど変わらないことがわかる。通常のコンクリート施工では 4.5m^3 積載の生コン車の荷降ろしに要する時間は 5 分から 30 分程度である。サンプリングタイムが長くなりすぎると品質の変動を適切に捉えることができない。したがって、実用性と測定値の精度を併せて考えると、 $\sigma = 5 \text{kg/m}^3$ 程度となるサンプリングタイム 60 秒から、 $\sigma = 3 \text{kg/m}^3$ 程度となるサンプリングタイム 120 秒程度が適当ではないかと考えられる。そこで、較正式の UW には配(調)合から計算して得られる一定値を用いて、サンプリングタイムを 120 秒として算定した単位水量の測定結果の一例を基準値が 185kg/m^3 の場合について図-10 に示す。サンプリングタイムが 120 秒の場合の測定値の標準偏差は $\sigma = 2.7 \sim 3.2 \text{kg/m}^3$ であり、RI 水分計による測定値は、単位セメント量が $300 \sim 350 \text{kg/m}^3$ 程度の配(調)合で $2\sigma = 6 \text{kg/m}^3$ 程度の測定精度を有すると考えると、水セメント比

で 1.5%程度の精度で測定できる可能性があると考えられる。

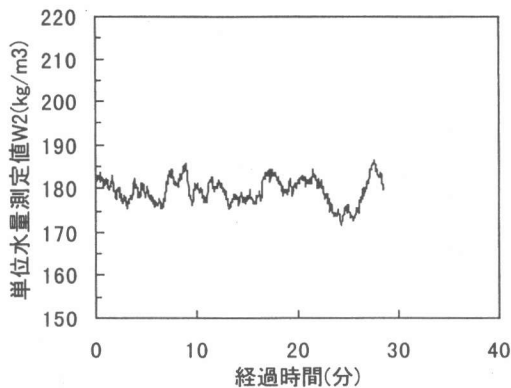


図-10 単位水量測定結果の一例

(単位水量 185kg/m³、サンプリングタイム 120 秒)

5. まとめ

配管中を流れるコンクリートの単位水量を連続測定することを目的とした RI 水分計の基礎的な性能に関する実験の結果、実用化への可能性を確認することができた。

- ①単位水量の算定方法は、 γ 線密度計の測定値を直接用いることなく、配(調)合から求めた密度を用いる方法の方が測定値のばらつきが小さい。
- ②単位水量の測定値の平均は、配(調)合上の単位水量とほぼ一致した。
- ③単位水量の測定値は繰り返し実験を行った場合に、測定値の平均と配(調)合上の単位水量との差は小さく、RI 水分計による測定値の再現性が確認できた。
- ④単位水量測定値のばらつきはサンプリングタイムが長いほど小さくなる傾向にあり、実用性と測定精度を考慮すると、サンプリングタイムは 60 秒から 120 秒程度が適切と考えられる。

謝辞

本研究は、(社)日本建材産業協会に設置された「鉄筋・鉄骨コンクリートの健全性評価方法の標準化のための調査研究委員会」のうち、「生コンの単位水量モニタリングシステム技術に関する調査研究」WG で実施したものである。同 WG 主査である足利工業大学 毛見虎雄教授ほか各委員の方々に、ご助言をいただきましたことを、ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) フレッシュコンクリートの単位水量推定試験方法：高性能 AE 減水剤コンクリートの調合・製造および施工指針(案)・同解説，日本建築学会，pp.105-110，1992
- 2) 瀬古繁喜・米澤敏男・井上孝之・熊原義文：RI 水分計によるフレッシュコンクリート中の単位水量測定に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，vol.10，No.1，pp.403-408，1997
- 3) (社)日本建材産業協会：平成 8 年度 通商産業省工業技術院委託 鉄筋・鉄骨コンクリートの健全性評価方法の標準化のための調査研究 成果報告書，pp.214-245，1997.3