

論文 RI 水分計による単位水量連続測定方法に関する検討

瀬古繁喜 *1・田村博 *2・鈴木一雄 *3・熊原義文 *4

要旨：生コンクリートの単位水量をコンクリート打設中に連続してリアルタイムで測定する方法として、RI 水分計を用いた方法を検討している。RI 水分計の実用化を目的として、測定結果に影響を及ぼすと考えられる要因のうち、圧送時の管内圧力、および細骨材の吸水率を取り上げ実験を行った。その結果、RI 水分計の測定値は管内圧力の影響を受けないこと、異なる吸水率の細骨材でも単位水量の違いが再現できることを確認した。吸水率の違いは校正係数の違いとなって現れるため、事前に工事に使用するコンクリートを用いて試験する校正方法について検討した結果を併せて示す。

キーワード：RI 水分計，単位水量，管内圧力，校正係数，吸水率

1. はじめに

生コンクリートの品質を管理する方法として、高速中性子の減衰割合から単位水量を測定するラジオアイソトープ(以下RIと略す)水分計を用いた連続測定方法について筆者らはこれまで検討してきた¹⁾。この方法は、従来試料採取や測定の手間を必要とした、いわゆるバッチ方式の各試験方法²⁾に比べて手間も少なく、さらに全コンクリート量の測定が可能となる。これまでの実験の結果、ポンプ配管を流れるコンクリートの単位水量連続測定について、単位水量の違いの再現性や測定値のばらつきの程度などに関して基本的な可能性を検証できた。RI 水分計による測定精度に関しては、骨材の比重・吸水率の変動が大きな影響を及ぼすとの報告がある³⁾。本論文ではRI 水分計を用いた単位水量の連続測定方法において影響を及ぼすと考えられる要因のうち、圧送時の管内圧力、および細骨材の吸水率の影響について検討した結果を示す。さらに、工事に使用するコンクリートを用いて事前にRI 水分計を校正する試験方法について検討した結果を示す。

2. RI 水分計の概要と校正式

RI 水分計は、放射線源(^{252}Cf : カリホルニウム)から放出された高速中性子の減衰割合が測定対象に含まれる水素原子の量によって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、コンクリート中を透過してきた高速中性子の数を検出管でカウントし、線源の標準カウント数に対する比(計数率比)により校正式(1)を用いて算定する。校正式は、中性子の減衰割合が全水分量の指数関数で表わされるものである¹⁾。RI 水分計の取付け状況は図-1に示すとおりである。

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

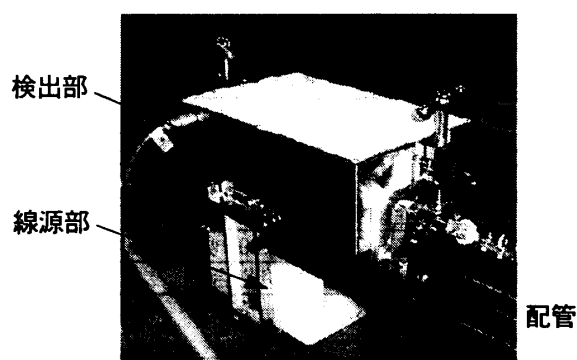


図-1 RI 水分計本体の取付け状況

*1(株)竹中工務店 技術研究所 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

Nm : 試料測定カウント (cpm)

Sm : 線源強度 (標準カウント: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 : 校正係数

測定値の標準偏差

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

ST : Nm のサンプリング時間 (min.)

3. 圧送時の管内圧力の影響

ポンプ圧送の管内圧力の違いによるコンクリート密度の変動, また吐出流量の違いによって RI 水分計の単位水量測定値が影響を受ける可能性がある。これらの要因について実験的に検討した。

3. 1 実験概要

(1) 因子と水準

実験因子は管内圧力およびコンクリートの単位水量とした。管内圧力の目標値は 0.3N/mm², 0.4N/mm², および 0.5N/mm² の 3 水準とし, コンクリートの単位水量は, 165kg/m³, 185kg/m³, 205kg/m³ の 3 水準とした。実験は同じ配 (調) 合のコンクリートを 3 回繰り返して練り混ぜて行った。

(2) 材料と配 (調) 合

実験に使用した材料を表-1 に示す。コンクリートの配 (調) 合は表-2 に示す通りであり, スランプ 18 ± 2.5cm, 空気量 4.5 ± 1.5% を目標と

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(密度3.16)
細骨材	市原産陸砂(密度2.59, 吸水率2.67%)
	葛生産陸砂(密度2.69, 吸水率2.04%)
粗骨材	上磯産碎石(密度2.69, 吸水率0.4%)
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

表-2 コンクリートの配 (調) 合

No.	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)			
			セメント	水	細骨材	粗骨材
1	47.1	47	350	165	830	969
2	52.9	45.1		185	778	
3	58.6	43.7		205	726	

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(%)		
		圧力 ①	圧力 ②	圧力 ③	圧力 ①	圧力 ②	圧力 ③
205	1	19.0	18.0	18.5	3.2	4.0	4.0
	2	20.5	19.5	18.5	3.1	2.4	2.5
	3	19.0	19.0	19.0	3.0	3.8	4.5
185	1	12.5	16.5	14.5	3.0	3.1	2.9
	2	18.0	17.0	16.0	4.3	3.0	5.5
	3	14.5	14.5	14.5	3.0	3.4	3.7
165	1	12.0	16.0	13.0	5.0	6.0	6.0
	2	18.0	16.0	14.5	6.6	5.5	5.3
	3	17.0	16.5	16.5	6.0	6.2	7.0

※目標圧力①: 0.5N/mm², ②: 0.4N/mm², ③: 0.3N/mm²

した。コンクリート試料は市中の生コンプラントで製造した。表-3 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。

(3) 実験方法

コンクリート圧送実験に用いた装置は, ピストン式ポンプ (最大吐出量 115m³/hr) から全長約 35m 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, その近傍に圧力ゲージを取り付けた。吐出流量は, 配管出口にロードセルを介して吊り下げたホッパを設け, 単位時間あたりの質量増加を測定して算出した。

実験条件は, 圧送時の管内圧力が目標値となるように圧送速度を調整した。一回の実験では, 30 分間コンクリートを循環させるうち, 10 分ごとに管内圧力を変化させて単位水量を測定した。

3. 2 実験結果

(1) 管内圧力と吐出流量の測定結果

管内圧力と吐出流量の関係を図-2 に示す。管内圧力は 0.27N/mm² から 0.82N/mm² の範囲であった。吐出流量は配 (調) 合によって傾向は異なるものの管内圧力が高いほど多くなる。

(2) 管内圧力と単位水量測定値の関係

管内圧力と 10 分間の単位水量測定値の平均の関係を図-3 に示す。各単位水量の水準で, 管内圧力が変化しても単位水量測定値に大きな差はみられない。RI 水分計による測定結果は, 本実験の圧力の範囲では管内圧力, あるいは吐出流量の影響を受けないことが明らかとなった。

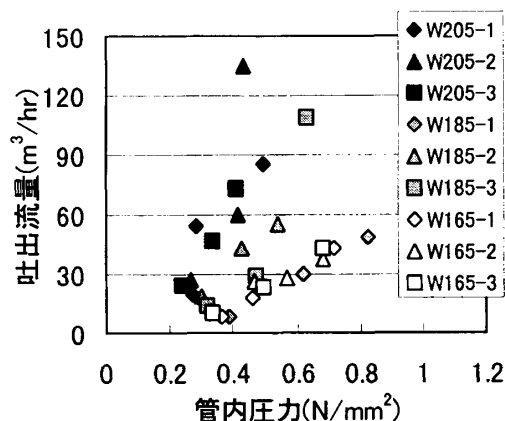


図-2 管内圧力と吐出流量の関係

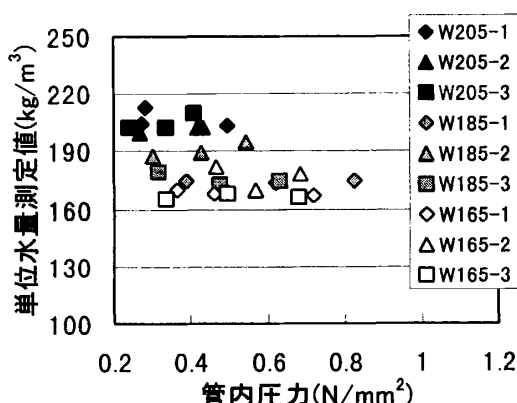


図-3 管内圧力と単位水量測定値の関係

4. 細骨材吸水率の影響

RI 水分計は測定対象の全水分量を測定する特徴を有することから、骨材の吸水率が異なることによって単位水量測定値が影響を受けることが考えられる。ここでは細骨材の吸水率の影響を検討するために、セメント量・粗骨材量一定とし、同一の粗骨材種類の下で実験を行った。

4. 1 実験概要

(1) 因子と水準

実験因子は細骨材の吸水率およびコンクリートの単位水量とした。吸水率は1.4%、2.6%、および6.1%の3水準とし、コンクリートの単位水量は165kg/m³、185kg/m³、205kg/m³の3水準とした。実験は、各々の組合せのコンクリートを2回繰り返して練り混ぜて行った。なお、吸水率1.4%の細骨材に関する結果は、既往の発表データ¹⁾によるものである。

(2) 材料と配(調)合

表-4 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(密度3.16)
細骨材	(A)大井川水系陸砂(密度2.61、吸水率1.41%)
	(B)混合砂(密度2.60、吸水率2.63%)
	(C)混合砂(密度2.49、吸水率6.05%)
粗骨材	青梅産硬質砂岩碎石(密度2.62、吸水率1.59%)
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

表-5 コンクリートの配(調)合

細骨材 種類	No.	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)			
				セメント	水	細骨材	粗骨材
B	1	47.1	49.7	350	165	877	905
	2	52.9	48.2		185	824	
	3	58.6	46.6		205	773	
C	1	47.1	49.7	350	165	841	905
	2	52.9	48.2		185	791	
	3	58.6	46.6		205	741	

細骨材は、吸水率1.4%の陸砂単味(A)、および吸水率2.6%の混合砂(B)と吸水率6.1%の混合砂(C)を使用した。混合砂BおよびCはJISの粒度分布に適合するように調整したものである。実験に使用した材料を表-4に示す。コンクリートの配(調)合は、スランプ18±2.5cm、空気量4.5±1.5%とし、試験練りにより定めた。コンクリートの配(調)合を表-5に示す。コンクリートは、容量250リットルの強制練りパン型ミキサーを用い、実験室内で1バッチの練り量を200リットルとして1回の実験につき2バッチ練り混ぜた。

(3) 実験方法

コンクリート圧送実験に用いた装置は、既発表の実験装置¹⁾と同一とし、スクイズ式ポンプから全長約15mの配管を接続して、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。ポンプ配管の圧力勾配などの実験条件も同一とし、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の測定を実施した。

4. 2 実験結果

(1) 吸水率と校正係数 α の関係

校正係数 α は、RI水分計の測定値が配(調)合上の単位水量と合致するように定めた。異なる吸水率ごとに算定したRI水分計の校正係数 α

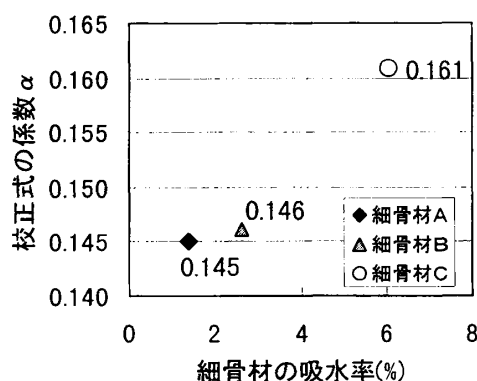


図-4 細骨材の吸水率と校正係数の関係

と、細骨材の吸水率の関係を図-4に示す。校正式の係数 α は細骨材の吸水率が大きいほど大きな値となる傾向にある。これは、RI水分計が測定対象の全水分量を計測するという特徴を有するために、吸水率が大きな材料を用いる場合には、表乾状態を基準とする配(調)合設計値に比べて、吸水率の大きな分だけ全水分量の増加があることが原因と考えられる。実際の工事では、生コンプラントごとに骨材などの使用材料が異なるため、実際の工事に用いる材料に対して校正係数 α を定め、吸水率等の影響を補正しておく必要がある。

(2) 単位水量測定値の再現性

校正係数 α を異なる吸水率ごとに定めて算出したRI水分計の単位水量測定値の30分間の平均と、配(調)合上の単位水量の関係を図-5に示す。RI水分計による測定値と配(調)合上の単位水量の差は平均が 3.4kg/m^3 、最大で 8.2kg/m^3 で

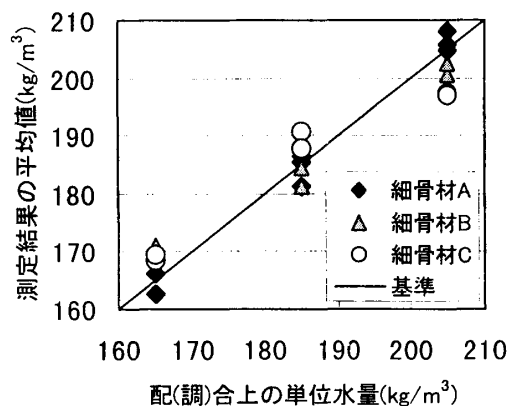


図-5 配(調)合上の単位水量と単位水量測定値の関係

あり、繰り返しのばらつきも小さく、配(調)合上の単位水量の違いを再現できている。したがって、RI水分計は校正式の係数 α を適切に定めることにより、吸水率の違いに関係なくコンクリートの単位水量を再現できるといえる。

(3) 測定値の標準偏差と線源強度の関係

実験時期の異なる細骨材Aと、細骨材B、Cの実験結果から、サンプリング時間を120秒としたときの単位水量測定値の標準偏差を表-6に示す。細骨材Aでは標準偏差は $2.5 \sim 6.2\text{kg/m}^3$ であったのに対し、細骨材Bおよび細骨材Cでは $3.3 \sim 9.0\text{kg/m}^3$ と大きい。実験では同一の放射線源を用いているが表-6に示すように、2年間の経年変化による線源強度の低下が標準偏差の大きくなった原因と考えられる。これは、測定値の標準偏差が線源強度の平方根に反比例することを示す式(2)の現象を表わしており、必要な精度を確保するにはサンプリング時間を長くするなどの対処が考えられる。

(4) 単位水量確認結果

フレッシュコンクリートの単位水量は、RI水分計以外に高周波加熱乾燥法²⁾によって測定した。高周波加熱乾燥法による単位水量測定結果を表-7に示す。配(調)合上の単位水量と測定結果の比は0.98から1.04の範囲にあり、図-5のRI水分計の結果が0.96から1.04であったことと比較すると、高周波加熱乾燥法とRI水分計の測定値は同程度の再現性を有している。

表-6 単位水量測定値の標準偏差

配(調)合 単位水量 (kg/m^3)	実験の 回数	測定値の標準偏差 (kg/m^3)		
		細骨材A	細骨材B	細骨材C
165	1	3.2	3.8	5.6
	2	4.2	3.4	4.7
185	1	2.7	9.0	5.5
	2	6.2	4.9	7.0
	3	2.5	—	—
205	1	3.3	8.0	6.1
	2	2.9	3.3	6.9
	3	3.3	—	—
平均値		3.5	5.4	6.0
最大値		6.2	9.0	7.0
最小値		2.5	3.3	4.7
線源強度(μCi)		20	12.4	

表-7 高周波加熱乾燥法による
単位水量測定結果

細骨材 種類	配(調)合 単位水量 (kg/m ³)	単位水量測定結果(kg/m ³)		
		実験繰返し		
		1回目	2回目	3回目
A	165	170.1	168.9	-
	185	186.7	187.9	186.3
	205	201.3	204.4	205.7
B	165	163.8	164.6	-
	185	182.7	184.8	-
	205	213.7	205.1	-
C	165	170.0	171.4	-
	185	191.2	192.4	-
	205	207.4	204.9	-

5. 校正方法に関する検討

細骨材吸水率の影響を受ける校正係数 α は、実際の工事に使用する材料ごとに定める必要がある。そこで、事前に校正係数 α を得る方法として、ポンプ配管を模擬した校正用配管にコンクリート試料を詰め、コンクリートが流動する代わりにRI水分計を配管に対して相対的に一定速度で移動させる校正試験方法を検討した。

5. 1 実験概要

(1) 因子と水準

実験因子は細骨材の種類、およびコンクリートの単位水量とした。細骨材の種類は2種類とし、各々の細骨材についてコンクリートの単位水量を165kg/m³、185kg/m³、205kg/m³の3水準とした。

(2) 材料と配(調)合

実験に使用した材料を表-8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%として試験練りにより定めた。コンクリートは、容量50リットルの強制練りパン型ミキサを用い、

表-8 コンクリートの材料

種類	性質
セメント	3銘柄混合普通ポルトランドセメント(密度3.15)
細骨材	(A)城陽産山砂(密度2.57、吸水率2.38%)
	(B)日比産海砂(密度2.60、吸水率1.16%)と横尾山産砕砂(密度2.61、吸水率1.21%)の混合砂
粗骨材	宝塚産碎石(密度2.65、吸水率1.02%)
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

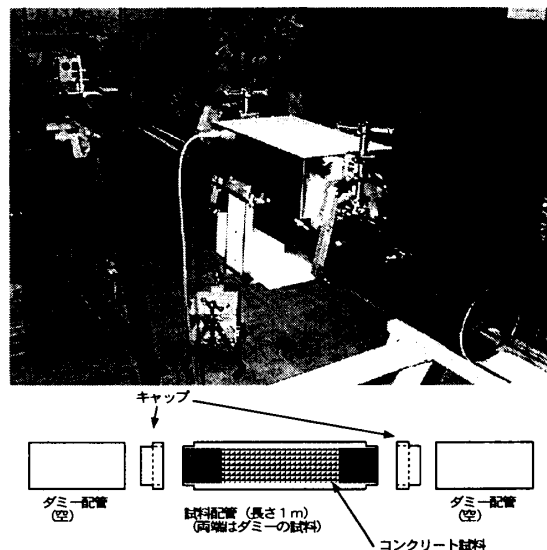


図-6 校正試験装置

実験室内にて1バッチの練り量を約20リットルとして練り混ぜ、全量を校正実験に供した。

(3) 実験方法

実験装置は、図-6に示すように、コンクリート試料を長さ1mの試料配管に詰めてキャップで密閉し、両端にダミー配管を接続した模擬配管に対し、RI水分計を配管に沿わせて毎秒0.25cmで移動させた。模擬配管は外径139mm、肉厚3.5mmのものを使用した。試料配管1本に対し、両端部には同一配(調)合のダミー試料を15cmの厚さずつ詰め、校正試料は約10リットル使用した。1回の計測では2組の模擬配管を使用し、練り混ぜたコンクリート全量を測定した。

5. 2 実験結果

試料配管内の単位水量測定結果の一例を図-7に示す。配管内の単位水量の分布は概ね大きな変動や偏りなく測定することができた。校正用のコンクリート試料を詰めた部分の単位水量測定値の平均と、配(調)合上の単位水量の関係を図-8に示す。RI水分計校正装置による単位水量の測定値は、細骨材Aおよび細骨材Bの場合ともに配(調)合上の単位水量の違いを再現することができた。したがって、本試験方法によって校正が可能であると考えられる。

校正試験による係数 α の値は、細骨材Aが0.1626、細骨材Bが0.1603であった。細骨材A

に誤って細骨材Bの校正係数を用いた場合の測定結果と、もとの細骨材Aのデータの比較を図-9に示す。校正係数 α が約0.002違うことによる単位水量測定結果の差は約 6kg/m^3 であることがわかる。

6. まとめ

RI水分計を用いた単位水量連続測定方法につ

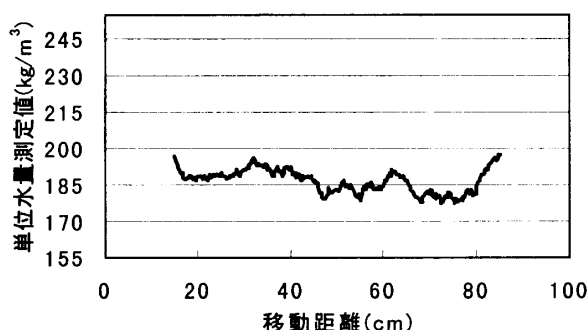


図-7 単位水量測定結果の一例
(細骨材A、単位水量 185kg/m^3)

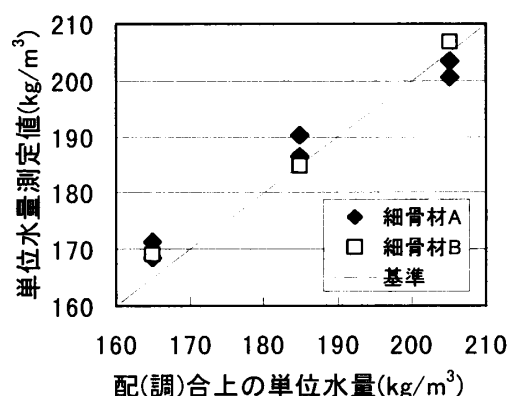


図-8 配(調)合上の単位水量と
単位水量測定値の関係

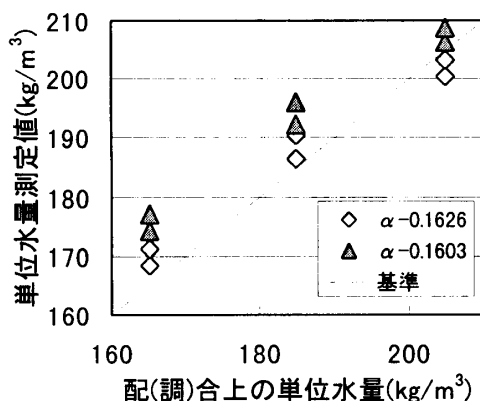


図-9 校正係数の影響比較

いて、単位セメント量・粗骨材量、および粗骨材種類を一定とした条件の下で、圧送圧力および細骨材の吸水率の影響、校正試験方法に関する実験を行って得られた結果を以下にまとめる。

- ①ポンプ圧送時の管内圧力、吐出流量は、RI水分計の単位水量測定値に影響を及ぼさない。
- ②細骨材の吸水率によって校正係数 α は異なる。
- ③細骨材の吸水率が異なる場合でも、校正係数を適正に定めることによりRI水分計の測定値は配(調)合上の単位水量の違いを再現できる。
- ④今回提案した、実際に工事に使用するコンクリートを用いる校正試験方法は、配(調)合上の単位水量の違いを再現することができ、校正係数を得ることができる。

今後は、校正試験で得た校正係数の実際の圧送状態での測定への適用性について検討するとともに、骨材の吸水率の日内・日間変動の影響等について施工実験により検証する予定である。

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で実施されたものである。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) 瀬古繁喜・田村 博・鈴木一雄・熊原義文：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、コンクリート工学年次論文報告集, vol.20, No.1, pp.125-130, 1998
- 2) フレッシュコンクリートの単位水量推定試験方法(高周波加熱乾燥法)：日本建築学会, 高性能AE減水剤コンクリートの調査・製造および施工指針・同解説, 1999
- 3) 山本忠守・藤岡正男・水野津与志：RI水分計によるフレッシュコンクリートの単位水量の早期迅速試験方法に関する研究, 日本道路公団試験所報告, Vol.28, pp.63-71, 1991.11