

連続式RI法によるトンネル覆工コンクリートの単位水量測定

田中淳一* 岩船 創** 山下正治*** 山森和博***

平成 15 年に国土交通省から「レディーミクストコンクリートの品質確保について」¹⁾ が通知され、一定規模以上の公共工事においてはフレッシュコンクリートの単位水量を測定することが定められた。単位水量の測定には乾燥法や単位容積質量法等が実用化されているが、これらはあくまで抜取り検査でしかない。

一方、放射性同位体 (RI:Radio Isotope) を利用する RI 法においては唯一、ポンプ圧送中の単位水量を連続計測することができる。本報では連続式 RI 法によるトンネル覆工コンクリートの単位水量測定についてその精度と信頼性について報告する。

キーワード: RI 法, 単位水量, 連続計測, 精度, 信頼性

1. はじめに

平成 15 年に国土交通省から「レディーミクストコンクリートの品質確保について」¹⁾ が通知され、国が発注する一定規模以上の工事 (土木: 1 日当たりのコンクリート使用量 100m³以上、建築: 延床面積 1500m²程度以上) においてコンクリートの単位水量を測定することが求められるようになった。

本通知につづいて提示された測定要領 (案)²⁾ では、判定基準と要求精度を満たす測定機器が Table 1 のようにエアメータ法を基本として示され、いずれを用いて測定しても良いことになった。しかし、エアメータ法を中心とした単位水量測定方法は通常の荷卸し検査のようにアジテータ車から、コンクリート全体の単位水量を測定したものにはなっていない。

一方、圧送配管上に設置した測定器から発するγ線および中性子線を連続してコンクリートに照射することで単位水量を測定する連続式 RI 法は、唯一フレッシュコンクリートの単位水量を連続測定が可能な手法として厳密な品質管理が要求されるトンネル覆工や高強度コンクリートの品質管理において注目を集めている。

本報では、「北海道横断自動車道 浦幌町 炭山第 1 トンネル工事」および「佐賀 497 号 山彦トンネル新設工事」において覆工コンクリートの単位水量測定に用いた RI 法について測定概要および精度と信頼性についての調査研究結果を報告するものである。

全 4289 回の測定結果から配合設計に対する測定値の差はおおむね-5kg/m³~5kg/m³の範囲におさまり、標準偏差 5.13kg/m³、また、理論上の測定誤差として 0~0.9kg/m³ と良好な精度と信頼性を有することを確認した。

*	技術研究所 建設材料研究グループ
**	北海道支店 炭山第 1 トンネル作業所
***	九州支店 山彦トンネル作業所

Table 1 各種単位水量測定法

エアメータ法 (土研法)	エアメータ法 (W Checker)
水中質量法	高周波加熱乾燥法
W/C ミータ	乾燥炉法
静電容量法	連続式 RI 法
水濃度法	塩分濃度差法

2. RI 法による単位水量の連続測定

2. 1 測定原理

RI とは Radio Isotope (ラジオアイソトープ: 放射性同位体) の略で、同位体とは原子核を構成する陽子と中性子のうち、陽子数は同じであるが中性子数が異なるものをいう。同位体の中で時間経過にともない放射線崩壊により電磁波や中性子などの放射線を放出する物質を放射性同位体と呼ぶ。

RI 法ではコバルト 60 (以下 ⁶⁰Co) が発生するγ線 (電磁波) およびカリフォルニウム 252 (以下 ²⁵²Cf) が自発核分裂する際に発生する中性子を利用する。⁶⁰Co が放射するγ線はコンクリート中を密度に応じて減衰して透過する。一方、²⁵²Cf が放射する中性子は水素と同程度の質量であるため、コンクリート中の水が持つ水素原子に衝突するとその速度を大いに落として減衰するが、水素以外の質量の重い物質に衝突しても跳ね返るのみで減衰することはない (Fig.1参照)。

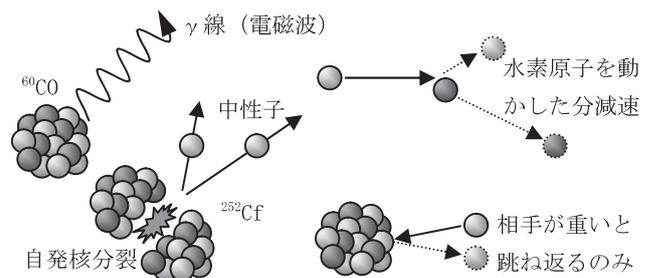


Fig.1 放射性同位体の模式図

このような特性から⁶⁰Coおよび²⁵²Cfをコンクリートに照射すると、模式図に示すようにそれぞれコンクリートの密度および単位水量に応じてγ線および中性子線が減衰する。連続式RI法はFig. 2³⁾に示すように配管上に設置した線源から配管中のコンクリートに照射した⁶⁰Coおよび²⁵²Cfの減衰量を検出部においてカウントし、制御部にて処理・計算することでコンクリート中の単位水量を測定するものである。

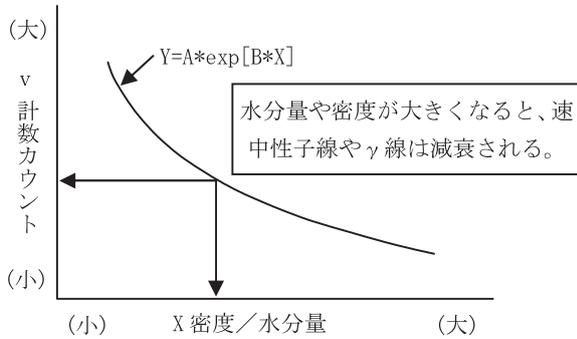


Fig. 2 応答特性の模式図

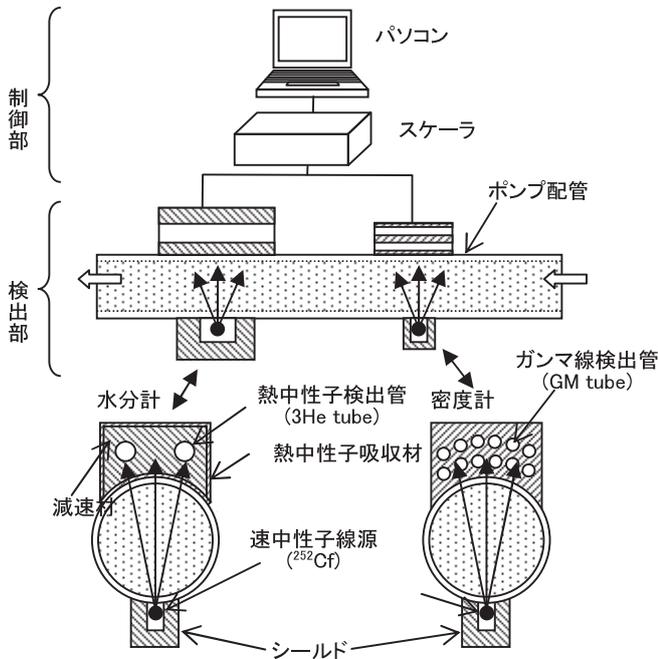


Fig. 3 RI法測定機器構成

2. 2 水分補正係数α

RI法で測定される水分量には骨材に吸水している水分量を含むため、コンクリート中の単位水量を測定するためにはこれを補正する必要がある。このときの補正係数をRI法では水分補正係数αと呼んでいる。

αの決定には打設毎に変動はないとして試験配合からαを固定する「室内α法」とコンクリートの材料変動を考慮して打設コンクリートからαを求める「現場α法」の2種類がある。「現場α法」ではRI法以外の手法で測定した単位水量とRI測定値を打設毎に比較することでαを決定するため単位水量の決定に仮定は存在するが現実の材料変動を考慮するので品質管理上有利である。

2. 3 測定手順

2. 3. 1 使用機器

本報ではソイルアンドロックエンジニアリング(株)製、連続式RIコンクリート水分計COARAを使用してコンクリートの単位水量を測定した³⁾。COARAの仕様をTable 2に機器の概観をphoto. 1に示す。

Table 2 COARA仕様

測定方式	密度計:γ線透過型 水分計:速中性子線透過型
測定項目	密度計:単位容積質量 U_0 (kg/m ³) 水分計:等価水分量 W_r (単位水量 W) (kg/m ³)
校正範囲	密度計: $U_0=1500\sim 2500$ (kg/m ³) 水分計: $W_r=350\sim 750$ ($W=100\sim 250$) (kg/m ³)
測定パイプ	5インチ (125A) (標準)
測定時間	任意
線源	ステンレスカプセル密封
	⁶⁰ Co2.59MBq (密度計) ²⁵² Cf1.11MBq (水分計)
検出管	GM計数管 (密度計) ³ He比例計数管 (水分計)
使用温度	0~50°C
電源	AC100V±10%
重量	密度計:15kg 水分計:21kg
	スケーラ:3kg
寸法	密度計:380W x 230D x 430H (mm)
	水分計:520W x 270D x 430H (mm)
	スケーラ:280W x 210D x 100H (mm)

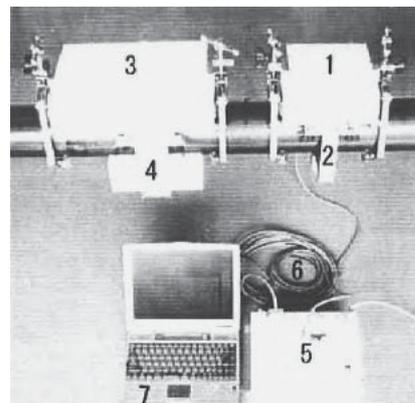


photo. 1 COARA概観

2. 3. 2 測定点の移動平均

圧送中のコンクリートは非常に乱された状態であるため個々の測定点もFig. 4³⁾に示すように乱れた状態となる。この乱れは移動平均を取ることで補正でき (Fig. 5), COARAでは1v秒毎にサンプリングした測定点を後方20点で移動平均を取ることで補正を行っている。補正後の各値はアジテータ車毎に平均され、測定された単位水量はアジテータ車毎に報告される。

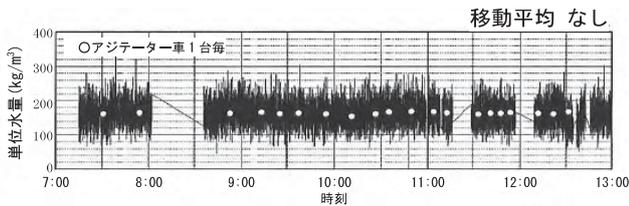


Fig. 4 移動平均による測定点の相違 (移動平均なし)

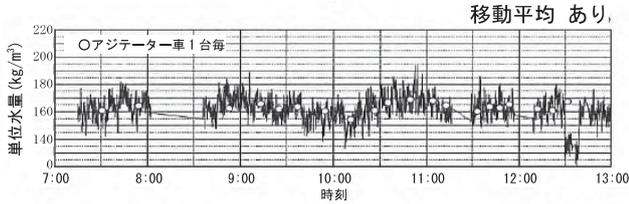


Fig. 5 移動平均による測定点の相違 (移動平均あり)

2. 3. 3 測定管理画面

RI 法で測定された単位水量はFig. 6に示すように、PC 画面上でリアルタイムに表示され、単位水量の設計値、上下管理値、各アジテータ車毎の平均から圧送中の単位水量を連続して管理できるようになっている。

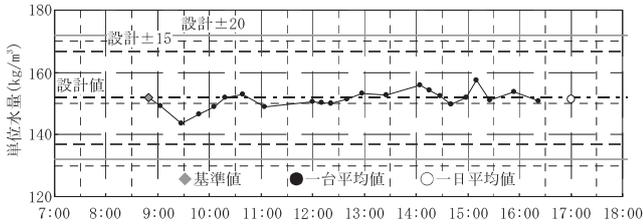


Fig. 6 現場測定表示例

2. 3. 4 現場運用フロー

Fig. 7に RI 法の運用フローを示す。水分補正係数 α は RI 法以外の手法 (エアメータ法, 高周波加熱乾燥法など) による単位水量を基準として求める。基準となる単位水量の測定は第 1 車目を除いた連続 3 車の測定から求めることを基本とする。

単位水量の測定値は直ちにパソコン画面上に表示されるので、異常が認められるならば直ちにプラントに連絡し原因の調査・究明を実施する。

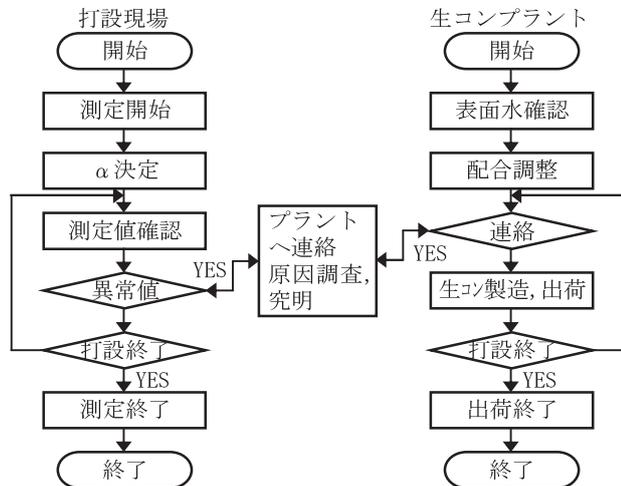


Fig. 7 現場運用フロー

3. 測定実施例

3. 1 現場概要

本研究報告で取上げた 2 現場の概要について次に示す。

3. 2 炭山第 1 トンネル工事

Table 3に工事概要, Fig. 8に覆工断面, Fig. 9に RI 法で測定した配合種類と適用区間, Table 4に使用コンクリートの配合表をそれぞれ示す。

RI 法による覆工コンクリートの単位水量測定には起点・終点側にそれぞれ一台ずつの COARA を用意し, 圧送ポンプに SYMTEC 社製 160-40-8 ST-60E (55.9kW/215rpm, 最大吐出量 60m³/h, 最大吐出圧 4.26MPa) を, 配管径 6 インチ, 配管延長 30~50m にて打設した。覆工厚は 300~400mm である。

打設期間は平成 20 年 12 月 13 日から平成 21 年 8 月 5 日までで 125 回打設を実施し, 1 回当たりの打設量はアジテータ車にて最大 34 台, 最小 18 台, 平均 24.4 台である。

Table 3 工事概要 (炭山第 1 トンネル)

工事名	北海道横断自動車道 浦幌町 炭山第 1 トンネル
工事目的	高規格幹線道路北海道横断自動車道「本別 IC~釧路 IC (仮称)」
発注者	国土交通省 北海道開発局 帯広建設開発局
工事場所	北海道十勝郡浦幌町字炭山
工期	平成 19 年 7 月 14 日~平成 22 年 2 月 12 日
施工者	(株)熊谷組・戸田建設(株)・荒井建設(株)
工法・形状	NATM (トンネル補助工法 AGF 一式)
地質	起点:中生代白亜紀 活平累層~終点:川流布累層
土被り	10 未満~140m
施工延長	1510m (仕上げ断面 73.8m²)

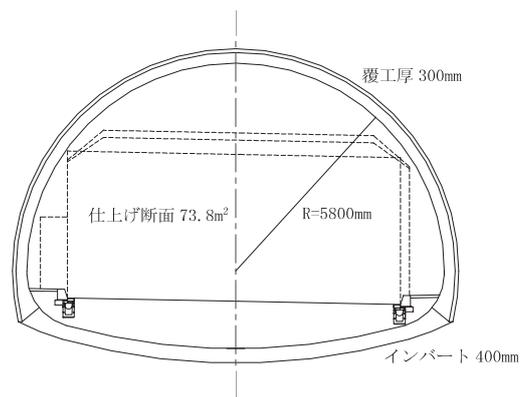


Fig. 8 標準覆工断面 (炭山第 1 トンネル)

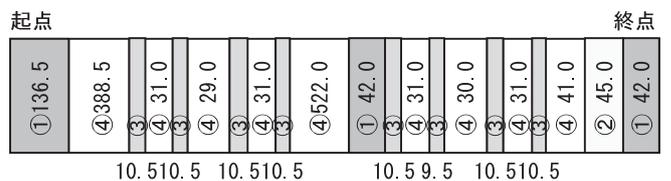


Fig. 9 配合種類(①~④)と適用区間(m)【炭山第 1 トンネル】

Table 4 配合表 (炭山第1トンネル)

配合	W/C (%)	s/a (%)	粗骨材径 (mm)	スラブ厚 (cm)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	S	G1	G2	Ad	繊維
①	46.8	45.5	25	18	153	327	830	1010		2.289	
②	51.0	44.0	40	18	152	298	815	737	315	2.384	
③	51.0	46.5	25	18	160	314	846	986		2.512	0.5
④	51.0	44.0	40	18	156	306	807	730	312	2.448	0.5

3.3 佐賀497号山彦トンネル新設工事

Table 5に工事概要, Fig.10に覆工断面, Fig.11にRI法で測定した配合種類と適用区間, Table 6に使用コンクリートの配合表, photo. 2に測定状況をそれぞれ示す.

RI法による覆工コンクリートの単位水量測定にはCOARA1台を用意し, 圧送ポンプにSYMTEC社製160-40-8MKW-35SM (37kW/200V, 最大吐出量35m³/h, 最大吐出圧4.09MPa)を, 配管径6インチ, 配管延長水平20m, 鉛直5mにて打設した. 覆工厚は300~350mmである.

今回報告する打設期間は平成21年2月7日から平成21年9月1日までの測定であり, 49回打設を実施し, 1回当たりの打設量はアジテータ車にて最大54台, 最小21台, 平均25.2台である. 以後も残数48回を打設する計画である.

Table 5 工事概要 (山彦トンネル)

工事名	佐賀497号山彦トンネル新設工事*
工事目的	高規格幹線道路西九州自動車道「佐賀497号唐津伊万里道路」
発注者	国土交通省 九州地方整備局 佐賀国道事務所
工事場所	佐賀県唐津市北波多下平野~行合野地先
工期	平成20年3月20日~平成21年12月4日
施工者	㈱熊谷組
工法・形状	NATM (補助ベンチ付全断面工法)
地質	古第三紀 漸新世 行合野砂岩層
土被り	0~160m
施工延長	957m (仕上げ断面66.8m ²)

* : 工事名は仮称

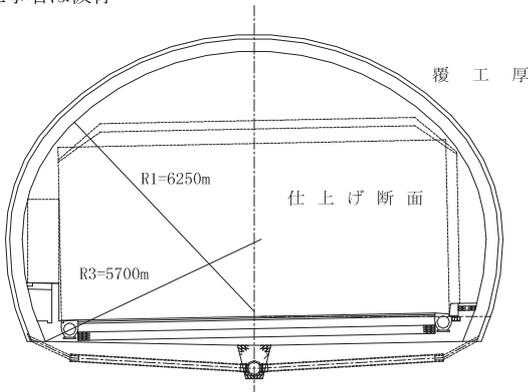


Fig. 10 覆工標準断面 (山彦トンネル)

起点				終点
B 71.8	C 20.6	A 411.1	未打	未打

Fig. 11 配合種類 (A~C) と適用区間 (m) 【山彦トンネル】

Table 6 配合表 (山彦トンネル)

配合	W/C (%)	s/a (%)	粗骨材径 (mm)	スラブ厚 (cm)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	S1 S2	G1 G2	Ad	膨張	繊維
A	54.5	51.0	20	18	165	303	540 367	675 283	2.272		
B	54.5	51.0	20	18	165	303	535 364	667 283	2.272	20	
C	54.5	51.0	20	18	174	319	548 372	618 260	2.552	20	2.76



photo. 2 現場測定状況

4. 測定結果

4.1 単位水量の管理値

国土交通省の通知において土木工事における単位水量の管理値は以下のように定められており, 測定現場においてもこれに従った⁴⁾.

- ① 配合設計±15kg/m³の範囲にある場合はそのまま施工してよい.
- ② 配合設計±15kg/m³を越え±20kg/m³の範囲にある場合は水量変動の原因を調査し, 生コン製造者に改善を指示し, その運搬車の生コンは打設する. その後, 配合設計±15kg/m³以内に安定するまで運搬車の3台毎に1回, 単位水量の測定を行うこととする.
- ③ 配合設計±20kg/m³の指示値を超える場合は, 生コンは打込まずに持ち帰らせ, 水量変動の原因を調査し, 生コン製造業者に改善を指示しなければならない.

4.2 単位水量の配合設計値に対する測定値の差

Table 7に単位水量の配合設計に対する測定値の差を示す. 全測定において先の管理値区分① (±15kg/m³の範囲)に入っており, 全体平均0.7kg/m³, 最大値14.8kg/m³, 最小値-14.1kg/m³, 標準偏差5.13kg/m³であった.

炭山第1トンネルにおける標準偏差は4.47kg/m³, 一方山彦トンネルの標準偏差は5.73kg/m³であり, RI法における配合設計に対する測定値の差はおおむね, 4~6kg/m³

の範囲に入るものと考えられる。なお、炭山第 1 トンネルにおいては起点および終点で別の測定器を用いたが、それぞれの標準偏差は 4.71 および 4.23 で測定器間に有為差は認められなかった。

Table 7 単位水量の配合設計に対する測定値の差

場所	配合	測定点	差(kg/m ³)			
			平均	最大値	最小値	標準偏差
炭山第 1	①	510	-0.6	14.7	-14.1	4.80
	②	151	-2.3	9.9	-11.7	4.40
	③	230	-0.1	9.4	-12.4	4.29
	④	2161	-0.1	12.2	-13.9	4.38
炭山第 1 全体		3052	-0.3	14.7	-14.1	4.47
山彦	A	1004	3.5	13.7	-12.1	5.46
	B	211	2.4	14.8	-13.8	6.95
	C	22	2.6	8.8	-9.3	4.13
山彦全体		1237	3.3	14.8	-13.8	5.73
全体		4289	0.7	14.8	-14.1	5.13

Fig. 12に全体および各測定現場における度数分布を、Fig. 13~Fig. 19に各配合における度数分布をそれぞれ示す。一部、度数の少ない配合（山彦 B）においてバラツキが大きいものの、全体として単位水量の配合設計に対する差は-5kg/m³~5kg/m³の範囲（65.2%）に納まっており良好な品質管理が行われていると言える。

本報告における測定対象配合は全てスランプ 18cm であるが、単位水量、粗骨材最大径、膨張材の有無、繊維の有無など配合に対する測定結果の差は認められなかった。

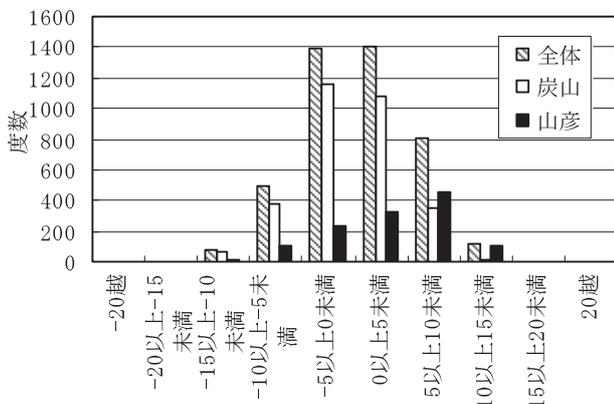


Fig. 12 度数分布 (全体・炭山・山彦)

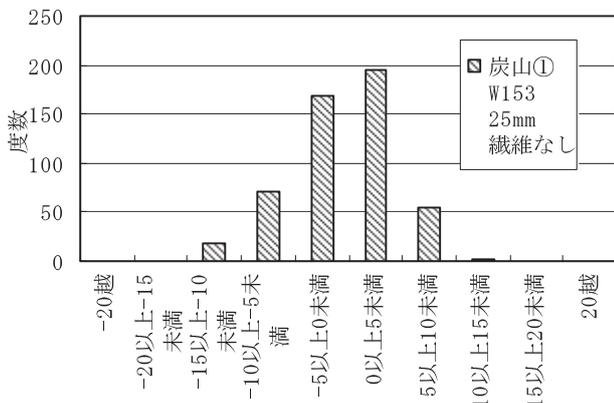


Fig. 13 度数分布 (炭山①)

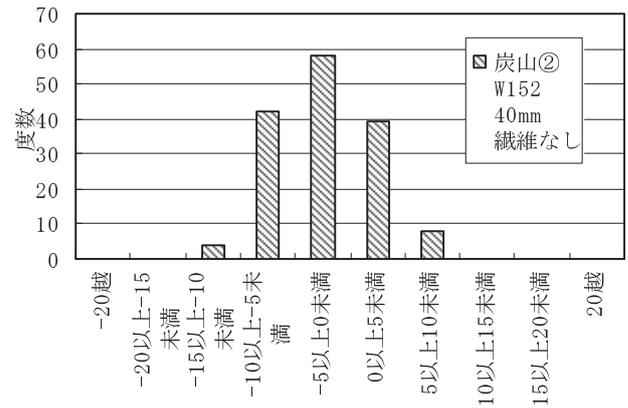


Fig. 14 度数分布 (炭山②)

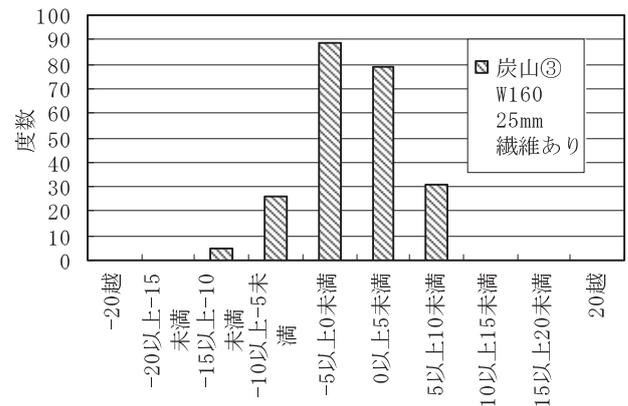


Fig. 15 度数分布 (炭山③)

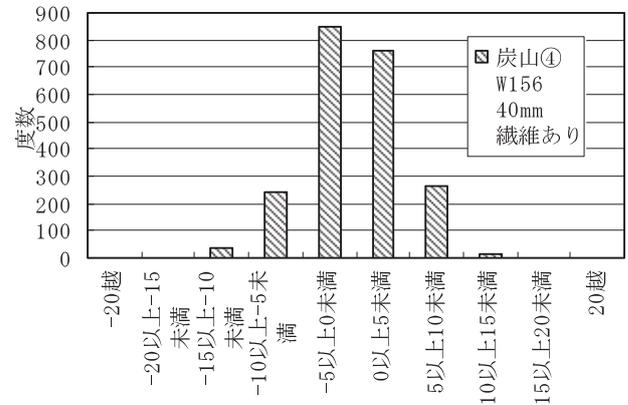


Fig. 16 度数分布 (炭山④)

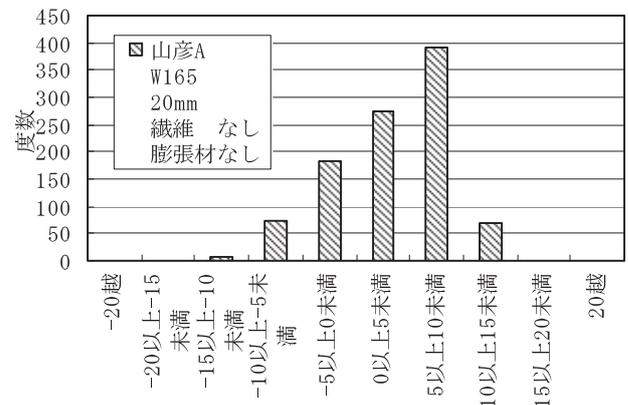


Fig. 17 度数分布 (山彦A)

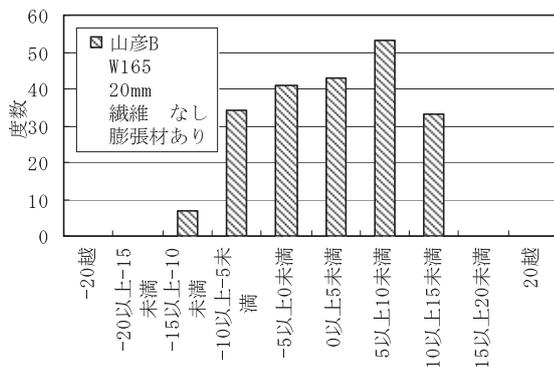


Fig. 18 度数分布 (山彦 B)

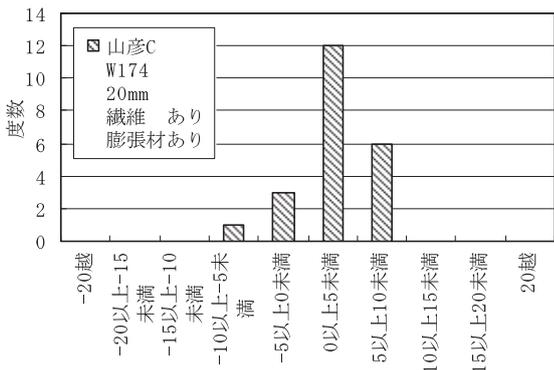


Fig. 19 度数分布 (山彦 C)

5. 精度と信頼性についての考察

RI法では放射線の数の揺らぎ(壊変する原子核の数の揺らぎ)に固有する誤差を持っている。⁵⁾ この時の誤差は測定時間の平方根に反比例するため測定時間が一点当たりの測定時間を十分にとることで小さくできる。

今回、アジテーター車毎における測定値に対する理論誤差の標準偏差は 0.2~0.9kg/m³ の範囲にあり、想定される表面水の測定誤差 (0~0.5%⁶⁾) による変動 0~9.3kg/m³ に比べ 1/10 であり、RI法による測定値は表面水の変動を良好な精度と信頼性で表わしているといえる。

6. まとめ

覆工コンクリートの単位水量を RI 法を用いて連続測定して得られた所見をまとめると以下のとおりである。

- ① 単位水量の配合設計に対する測定値の差はおおむね -5kg/m³~5kg/m³ の範囲である。
- ② 測定値の配合設計に対する全体の標準偏差は 5.13kg/m³ である。
- ③ 測定値の理論上の誤差は 0.2~0.9kg/m³ であり、想定される表面水の測定誤差にともなう変動の 1/10 程度である。

7. 謝辞

RI法の測定にあたっては測定器 COARA の開発・製造メーカーであるソイルアンドロックエンジニアリング(株)の延山氏に貴重な助言を頂いた。また、RI法による単位水量測定にご理解を示され協力していただいた本別コンクリート工業(炭山第1トンネル)およびホリデン生コン千々賀工場(山彦トンネル)の各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省, 国官技第 185 号平成 15 年 10 月 2 日付, レディーミクストコンクリートの品質確保について
- 2) 国土交通省, レディーミクストコンクリート単位水量測定要領(案), 2004 年 3 月
- 3) ソイルアンドロックエンジニアリング(株), RI コンクリート水分計—説明書—
- 4) 国土交通省, 国コ企第 3 号平成 15 年 10 月 2 日付, 「レディーミクストコンクリートの品質確保について」の運用について
- 5) 日本コンクリート工学協会, 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調査研究会 報告書, p.1792004.9
- 6) 既出 5), p.5

Sequential monitoring for unit water on lining concrete with RI (Radio Isotope) method

Junichi TANAKA, Hajime IWAFUNE, Masaharu YAMASHITA and Kazuhiro YAMAMORI

Abstract

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism informed notice that Ready Mixed Concrete should be monitored for unit water on fresh concrete with respect to their designated project in 2003. Monitoring methods for unit water have been developed such as drying method and unit weight method, and so on. These principal methods are nothing but random sampling for the monitoring.

RI (Radio Isotope) method, on the other hand, only allows sequential monitoring for pumping concrete in the pipeline. This report investigates accuracy and reliability of RI method which sequentially monitored unit water of fresh concrete on lining concrete.

Keywords: RI method, Unit water, Sequential monitoring, Accuracy, Reliability