

アジテータ車のドラム内に設置した プローブによるコンクリート品質の連続管理

Continuous Quality Control Method for Fresh Concrete Using Probe inside Drum

住 学*1
Sumi Manabu

要旨

アジテータ車のドラム内に設置したプローブ（ひずみ計、温度計などを内蔵した計測装置）により、スランプ、コンクリート温度および積載量等を推定する技術^{1),2)}は、海外工事において、運搬・荷卸し時の不正防止や誤納入対策として実績があり、今後の活用が見込まれる技術である。本報告では、プローブを国内レディーミクストコンクリートに適用した際の推定精度、ならびにプローブを用いた連続管理システムについて検討を行った。その結果、スランプ、コンクリート温度、および積載量を精度よく推定することが可能であり、出荷から荷卸しまでの経時変化を把握できることが確認された。

キーワード：アジテータ車 プローブ フレッシュコンクリート 連続管理 スランプ コンクリート温度

1. はじめに

レディーミクストコンクリートのフレッシュ性状は、運搬時間や気象条件などにより大きく変化するものの、運搬中の経時変化を通常の試験方法により把握することは困難である。このため、実際のレディーミクストコンクリートの品質管理では、工場における工程検査と製品検査、施工現場における荷卸し時の受け入れ検査があり、仕様書等で定められた検査頻度で行われる抜き取り検査にとどまっているのが現状である。

そこで筆者らは、アジテータ車のドラム内に設置したプローブ（ひずみ計、温度計などを内蔵した計測装置）により、スランプ、コンクリート温度および積載量等が推定できる技術^{1),2)}に着目し、本プローブを国内レディーミクストコンクリートに適用した際の推定精度、ならびにプローブを用いた連続管理システムについて検討を行った。本技術は、海外工事において、運搬・荷卸し時の不正防止や誤納入対策として実績があり、今後の活用が見込まれる技術である。

なお、本報告は既往の文献³⁾を加筆修正してとりまとめたものであり、各種実験や検討は、IBB probe 共同実験研究会に参画した生産者6社（GNN Machinery Japan、伊藤商店、炭平コーポレーション、東伸コーポレーション、長岡生コンクリート、依田儀一商店）と施工会社10社（青木あすなろ建設、浅沼組、安藤ハザマ、大木建設、鹿島建設、鴻池組、銭高組、東亜建設工業、戸田建設、東洋建設）によって実施したものである。

2. システムの概要

2.1 プローブおよびシステム構成

図1にプローブの構造を示す。プローブは先端からコネクタ部まで全長420mmであり、ひずみ計が内蔵された棒状部分は直径43mmのステンレス製である。図2に連続管理システムの構成を示す。連続管理システムは、プローブ、レシーバ（データの記録保存、兼表示装置）、ソーラーパネルから構成されている。

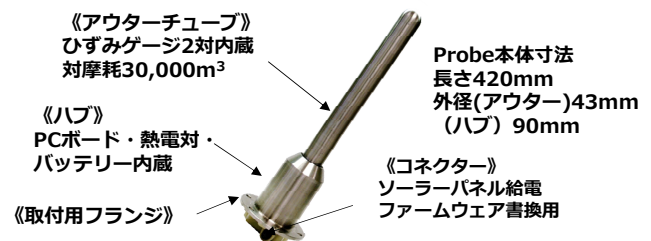


図1 プローブの構造



図2 システム構成

*1 技術研究所

2.2 推定原理

2.2.1 スランプおよびスランプフロー

プローブは、アジテータ車の点検口を利用してドラム中心に向かって内壁に垂直に設置され、ドラムの回転とともに 360° 回転する構造である。スランプ、スランプフローの推定は、プローブがコンクリートに接触する際に生じる圧力（プローブ圧力）とスランプ値、またはスランプフロー値の関係から作成したキャリブレーションテーブルを用いて行う。

2.2.2 コンクリート温度

コンクリート温度は図1に示した本体「ハブ」部分に内蔵された熱電対により計測される。

2.2.3 コンクリート積載量およびドラム回転数

図3に積載量の測定方法の概要を示す。積載量は、ドラム内でコンクリートがプローブに触れている角度から換算して推定される。また、ドラム回転数もプローブの角度と時間から計算される。

3. 実験概要

プローブの推定精度、連続管理システムについて検討するために、異なる季節において実験Ⅰ～Ⅳを実施した。表1にコンクリートの使用材料および調合を、表2にアジテータ車の諸元を示す。実施工場は3工場とし、実施時期は、夏期、標準期および冬期とした。コンクリートは、各工場の標準配合とし、呼び強度 24~60、スランプ 8~18cm、スランプフロー60cm、流動化の有無などを組み合わせた。

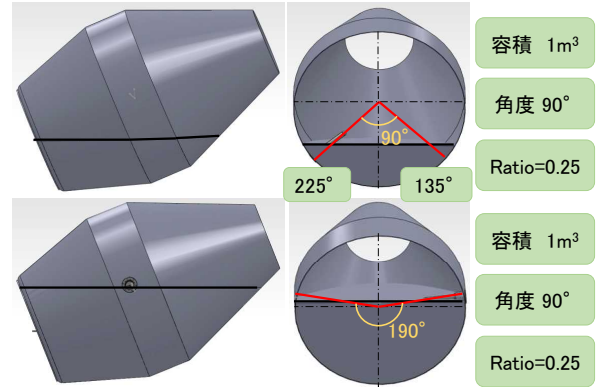


図3 積載量の測定方法の概要

表1 コンクリートの使用材料および調合

実験	工場	時期	配合 No.	呼び方	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						流動化の有無等	
							W	C	S1	S2	G1	G2		Ad
実験Ⅰ	A	夏期	1-1	24-12-20N	58.4	43.6	155	265	824	—	764	327	3.51 ¹⁾	—
			1-2	30-12-20N	51.8	42.4	155	299	789	—	767	329	4.34 ¹⁾	60 分後
			1-3	30-18-20N	51.0	45.7	164	322	832	—	707	303	2.90 ²⁾	—
			1-4	42-18-20N	39.9	41.8	171	429	715	—	713	305	3.86 ²⁾	—
			1-5	60-60-20N	35.6	47.4	175	492	800	—	—	907	5.90 ²⁾	—
実験Ⅱ	B	標準期	2-1	30-12-25BB	44.2	43.3	160	362	768	—	507	505	3.98 ¹⁾	60 分後
			2-2	24-12-25N	53.6	47.1	160	299	865	—	977	—	3.29 ¹⁾	—
			2-3	30-12-25N	46.3	44.7	162	350	799	—	995	—	3.85 ¹⁾	60 分後
			2-4	30-18-25N	46.3	45.8	176	380	791	—	942	—	4.18 ¹⁾	—
			2-5	30-18-20N	48.5	46.1	175	361	804	—	—	944	3.97 ¹⁾	—
			2-6	42-18-20N	39.3	46.0	163	415	796	—	—	939	3.32 ²⁾	90 分後
			2-7	60-60-20N	35.5	51.2	170	479	—	863	847	—	4.79 ²⁾	—
実験Ⅲ	A	冬期	3-1	30-12-20N	51.8	42.4	155	299	789	—	767	329	2.54 ¹⁾	—
			3-2	30-18-20N	51.8	45.8	167	322	829	—	703	301	1.61 ²⁾	—
実験Ⅳ	A	冬期	3-3	30-8-20N	51.8	45.8	153	295	858	—	726	311	2.51 ⁴⁾	練直後
			3-4	40-8-20N	39.0	37.5	156	400	665	—	794	340	3.40 ¹⁾	練直後
			4-1	24-8-20N	58.4	43.0	147	252	826	—	785	336	2.14 ¹⁾	4.5→3.0m ^{3 3)}
			4-2	42-8-20N	37.4	37.0	156	417	652	—	794	340	3.54 ²⁾	4.5→3.0m ^{3 4)}

使用材料

工場	A	B	C
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種	普通ポルトランドセメント
細骨材 (S1, S2)	混合砂 (1-1~1-4, 3-1~3-4, 4-1~4-2) 北海道苫小牧市樽前陸砂 (1-5)	富士川中流域砂 (2-1~2-6)、富士川水系砂 (2-7)	富士宮市上稲子産砕砂 (2-8)
粗骨材 (G1, G2)	G1 秩父郡横瀬町砕石 2005 (1-1~1-4, 3-1~3-4, 4-1~4-2) G2 吾川郡仁淀川町砕石 2005 (1-1~1-5, 3-1~3-4, 4-1~4-2)	富士川中流域砂利 2505 (2-1~2-4)、兵庫県相生産砕石 2005 (2-1, 2-5, 2-6, 2-7)、巨摩郡南部町産砕石 2005 (2-7)	G1 富士宮市安居山産砂利 2505

1) AE 減水剤、2) 高性能 AE 減水剤、3) 4.5m³の積載量を0.5m³ずつ排出し、3.0m³となった時点より流動化剤で流動化、4) 3.0m³で1時間経過後より加水

表2 使用したアジテータの諸元

コンクリート生産工場	工場 A	工場 B	工場 B	工場 B・C
アジテータ車記号	アジテータ車 1	アジテータ車 2	アジテータ車 3	アジテータ車 4
使用したアジテータ車	2台使用 (同型)		a号車	b号車
架装	メーカー	K社製	K社製	K社製
	型式	QDG-PW39L	KL-CW48A	ADG-CW4XL
	ドラム傾斜角度 (度)	16	16	16
	ドラム容量 (m³)	8.9	8.7	8.7
シャシー	最大混合容量 (m³)	4.5	4.4	4.4
	最大積載量 (kg)	10,960	9,710	9,710
	車輻総重量 (kg)	19,970	19,930	20,000
				19,940

3.1 スランプ推定方法の検討

プローブ圧力とスランプの関係は、指数近似式により導くことができるとされる¹⁾。実験Ⅰ～Ⅲでは、プローブ圧力と実測スランプの関係から得られた指数近似曲線による推定式を用いて、実測値との比較検証を行った。なお、プローブ圧力は、試料採取に伴うドラムの高速攪拌前後で変化するため、高速攪拌直前をプローブ圧力Ⅰ、高速攪拌直後を圧力Ⅱ、試料採取3分後を圧力Ⅲ（採取試料による実測とほぼ同じタイミング）と定義して比較検討を行った。

3.2 コンクリート温度および積載量

冬期では、プローブ計測温度と実測値を比較するため、ドラム内部のコンクリート温度と試料採取後のコンクリート温度を測定した。また、実験Ⅳでは積載量についてもプローブ連続記録データと実測値との関係を確認した。

3.3 試験方法および測定項目

3.3.1 スランプ試験方法

スランプ試験は、正確性を期すため1台のアジテータ車につき、2名の同一試験者が継続して測定することとした。

3.3.2 測定項目

測定項目は、通常の品質管理で行われる試験項目であるスランプ（スランプフロー）、コンクリート温度および空気量に加え、プローブによる連続測定として、プローブ圧力、コンクリート温度、ドラム回転数、およびプローブ角度とした。

3.3.3 測定方法

実測によるスランプ（スランプフロー）は、2名同時に試験した測定結果の平均値とした。測定は練上がりから最大150分後まで場内に待機させて30分間隔で行った。その間のプローブは連続記録を行った。待機中のドラム回転数は、コンクリートNo.1-1～No.2-8、No.4-1、およびNo.4-2については2rpm（1分間に2回転）、No.3-1及びNo.3-2に

については運搬中の回転数である0.8rpmとした。ただし、ドラム回転数0.8rpmについては、高速攪拌5分前に2rpmとしてデータ取得後に試料採取することとした。

4. 実験結果および考察

4.1 スランプおよびスランプフローの推定

4.1.1 プローブ圧力と実測スランプの関係

図4に実験Ⅰ～Ⅲにおけるプローブ圧力Ⅰ～圧力Ⅲと実測スランプの関係を示す。これは生コン工場や強度を区別せずに図示したものであるが、いずれも低スランプほどプローブ圧力が大きくなり、その関係は指数近似曲線で表すことができた。圧力Ⅰ～Ⅲの各時点で指数近似曲線に対する誤差は、どれもスランプ120mm程度以下の低スランプで生じる傾向があり、特に圧力Ⅱと圧力Ⅲでは大きかった。これは、低スランプのコンクリートは高速攪拌後に柔らかさの変化がばらつき、誤差が大きくなったものと考えられる。今回の結果から、指数近似曲線の相関係数が最も高い圧力Ⅰのケースでプローブ圧力と実測スランプの関係を求め、推定式を作成するのが最も適していると考え、以降、プローブ圧力Ⅰにおける実測スランプとの関係を使って考察する。

4.1.2 工場・呼び強度などの違いによる誤差の検討

図5に、工場、呼び強度およびアジテータ車の違いによるプローブ圧力Ⅰと実測スランプの関係を、図6に、指数近似曲線で推定した値に対する実測スランプの誤差分布を示す。なお、工場間の比較ではC工場はデータが少ないため、A工場とB工場を比較した。プローブ圧力Ⅰと実測スランプの関係は、(1)工場間については、同一の指数近似曲線上に分布している結果であった。(2)呼び強度については、低スランプデータの多い呼び強度24の誤差が比較的大きいものの、差異は認められなかった。また、(3)アジテータ車については、アジテータ車3において実測値が小

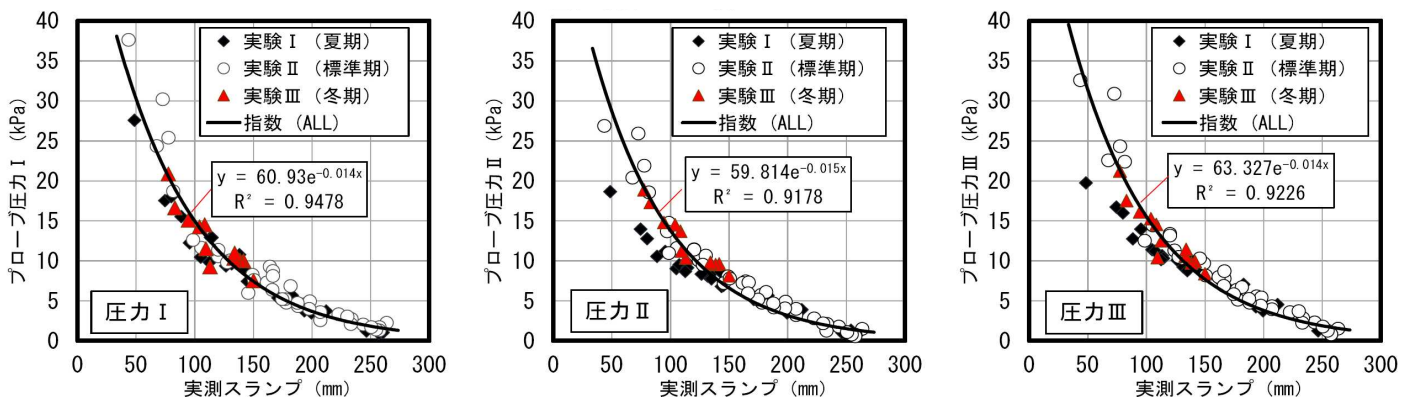


図4 実測スランプとプローブ圧力（Ⅰ～Ⅲ）の関係

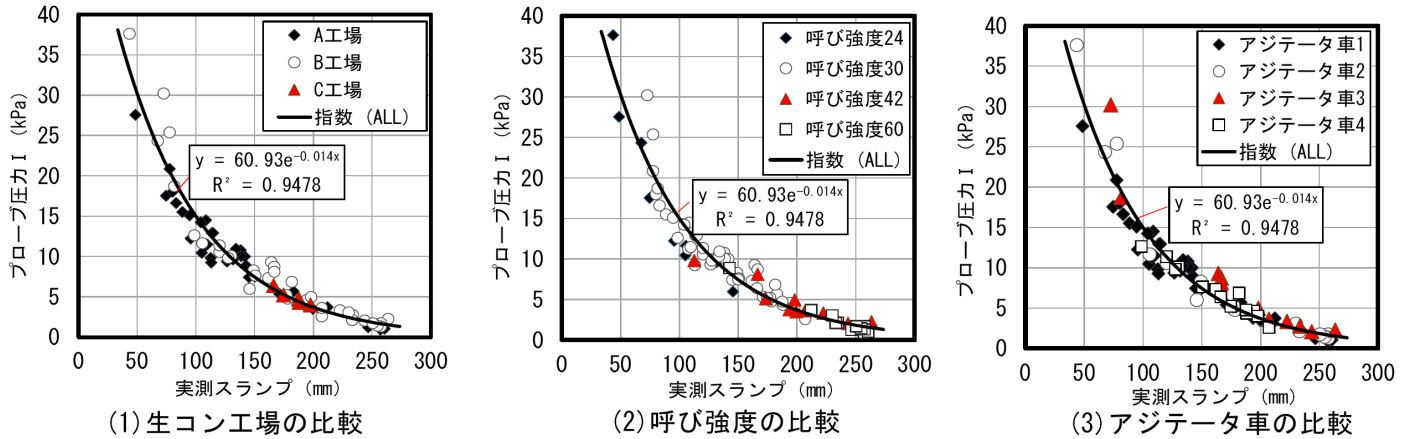


図5 工場、呼び強度およびアジテータ車の違いによるプローブ圧力Iと実測スランプの関係

さく推定されたものの、各車の誤差変動は同等であり、同一メーカー製でドラム仕様が同等であれば、プローブ圧力と実測スランプの関係に与える影響は少ないと考えられる。

4.1.3 スランプフローへの適用性

図7にスランプフローとプローブ圧力の関係を示す。スランプとの関係同様に、スランプフローが大きいほどプローブ圧力が小さくなっており、適切な近似式を作成することによりスランプフローの推定が可能であるといえる。ただし、スランプフローの大きな領域では、プローブ圧力の小さな差異が推定スランプフローに大きく影響するため、事前に入念なキャリブレーションテーブルの調整を行うことが必要と考えられる。

4.1.4 アジテータ車ドラム回転数の影響

図8に異なるドラム回転数による推定スランプを示す。回転数はプローブ計測時の標準である2rpmと運搬中の0.8rpmとした。いずれの回転数でも、推定スランプと実測スランプは、およそスランプ80~180mmの範囲でよく一致しており、ドラム回転数の違いによる差は認められず、運搬中のアジテータドラム回転数(0.8rpm)でもスランプ推定が可能であると考えられる。

4.2 推定スランプの検証

4.2.1 推定スランプの連続データ

図9にNo.1-4(42-18-20N)とNo.2-2(24-12-25N)のコンクリートの推定スランプと実測スランプの経時変化を示す。プローブ圧力による推定スランプの連続データと実測値は、スランプ低下の大小にかかわらず、よく対応している。実測スランプは試料採取して試験を実施しないと確認できないが、プローブによる推定スランプは連続データとして性状を把握することが可能であり、コンクリートの運搬中の品質変化をリアルタイムに管理できるものとする。

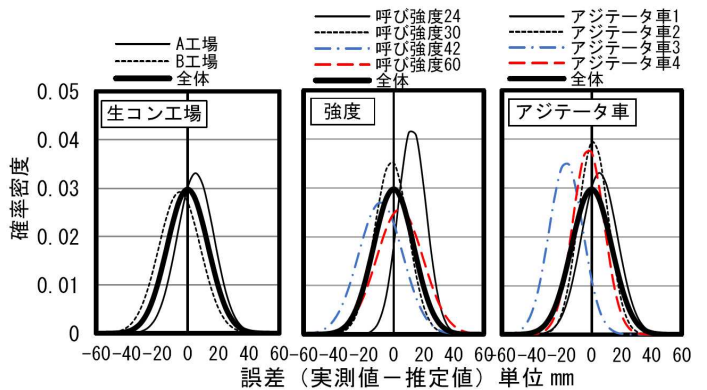


図6 指数近似曲線の推定値と実測値の誤差

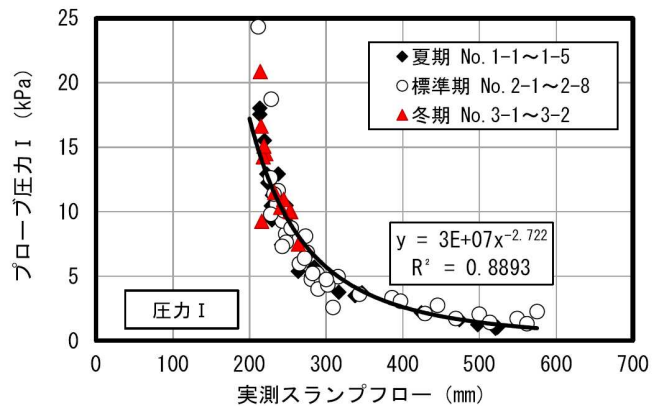


図7 スランプフローとプローブ圧力の関係

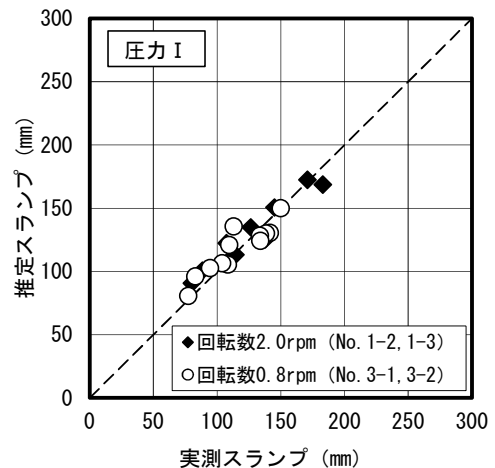


図8 異なるドラム回転数による推定スランプ

4.2.2 経時変化の推定

図10に回帰式による経時変化の推定(スランプ)を示す。コンクリートは前述と同様にNo. 1-4(42-18-20N)とNo. 2-2(24-12-25N)とした。前者は出荷後に若干スランプが増大し、経時変化の小さいケース、後者は出荷直後から徐々にスランプロスを生じ、経時変化の大きいケースである。経時変化の推定は、各々経時60分後までの推定スランプと経過時間から求められる回帰式により推定した結果を示した。No. 1-4のように出荷後にスランプが増大し、経時60分後以降にゆるやかにスランプロスを生じるコンクリートでは、多項式近似による回帰式を用いて経時変化の推定が可能であると考えられる。一方、No. 2-2のように出荷直後からスランプロスを生じるコンクリートでは、線形近似による回帰式を用いて、同様に推定可能であると考えられる。なお、回帰式を用いた経時変化の推定値と実測値との差は±15mm以内であった。

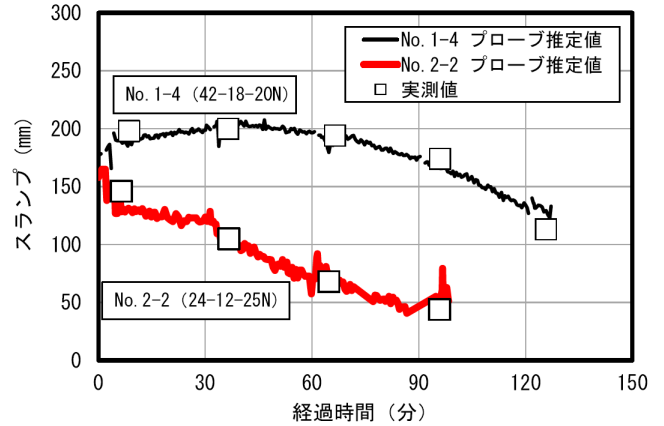


図9 推定スランプと実測値の経時変化

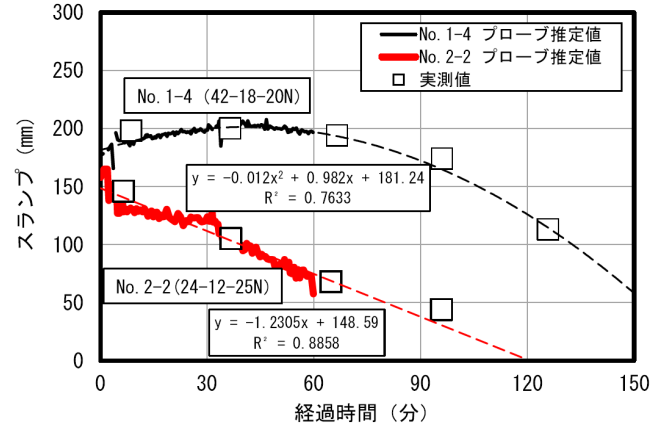


図10 回帰式による経時変化の推定(スランプ)

4.3 コンクリート温度および積載量

4.3.1 コンクリート温度

図11に、プローブ計測温度および試験時に採取した試料のコンクリート温度の経時変化の一例として、実験Ⅰ～Ⅲで使用した呼び方30-18-20Nの結果を示す。コンクリート温度は、いずれの計測方法とも同様の変動傾向を示したが、プローブの方が採取試料よりもやや高い値となった。この原因を明らかにするために、コンクリート温度について、プローブ計測温度とドラム内部およびフレッシュ試験用に採取した試料の温度計による実測値を比較した。

図12に、プローブ計測温度とドラム内部および採取試料によるコンクリート温度の関係を示す。ドラム内部のコンクリート温度はプローブ計測温度と同等であるのに対して、採取試料のコンクリート温度はプローブ計測温度よりも低いため、プローブで荷卸し時のコンクリート温度を推定する場合には、温度低下分について考慮する必要がある。

図13に、試料採取3分後(「圧力Ⅲ」測定時)のドラム内部におけるプローブ計測温度と採取した試料のコンクリート温度実測値の関係を示す。両者の相関は高く、コンクリート温度のプローブ計測値と実測値の比率は、本実験の範囲では試験時期にかかわらず概ね一定であった。

図14に、コンクリート温度のプローブ測定値と実測値の比の度数分布を示す。コンクリート温度比の分布は正規性を示しており、ほとんどのデータが1.025~1.125の範囲にあった。このことから、プローブによって測定したコンクリート温度から構造体に打込むコンクリート温度を比較的高い精度で推定可能と考えられる。

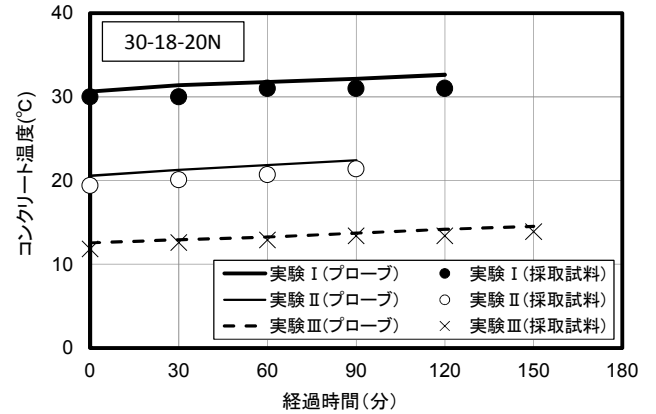


図11 コンクリート温度測定結果の一例(30-18-20N)

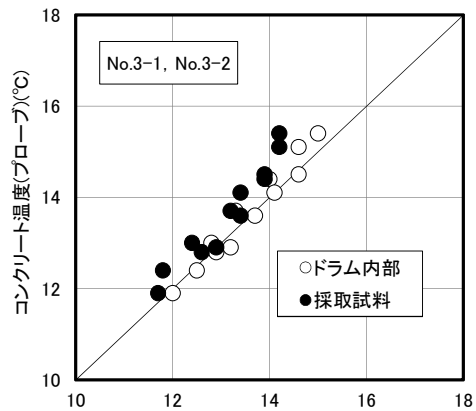


図12 測定箇所別のコンクリート温度

4.3.2 コンクリート積載量

図15に、コンクリート積載量の変動の一例として、実験IVにおけるコンクリート積載量を示す。1回あたりの試験試料採取として0.05m³、積載量変化確認のために0.3~0.5m³のコンクリート排出を行った場合に積載量の理論値と推定値は概ね一致するものと判断された。このことから、アジテータ車ドラムの内部を目視確認することなく、プローブによりコンクリートの積載量および残量の推定が可能であると考えられる。

図16に、実験Iにおける同一車両のコンクリート積載量推定値の連続測定結果を示す。ここでは、No.1-5(呼び方60-60-20N)の練上がり約150分(図中の横軸360分)以降に、積載量の推定値が大きくばらついた。これは、高温環境下で長時間ドラム内にあった高強度コンクリートがプローブ周辺に付着したためと推察される。このことから、本方法を精度よく運用するためには、プローブへのコンクリート付着に対する配慮が必要となる。

5. まとめ

アジテータ車ドラム内に設置したプローブを国内レディ-ミクストコンクリートに適用した際の推定精度、ならびにプローブを用いた連続管理システムについて検討を行った。本実験の結果から得られた知見は以下のとおりである。

- (1) スランプとプローブ圧力には高い相関があり、両者の関係を指数関数の近似曲線で表すことにより、スランプの推定式を作成することができる。
- (2) 事前に入念なキャリブレーションテーブルの調整を行うことで、スランプフローの推定が可能と考えられる。
- (3) 推定スランプと経時変化から得られる回帰式によりスランプの経時変化推定が可能と考えられる。
- (4) プローブを用いた連続管理システムによる推定スランプ、コンクリート温度および積載量の連続記録、ならびにレシーバへの推定スランプ等の記録表示が高い精度で実施可能であることを確認した。

参考文献

- 1) Denis Beaupre: RHEOLOGICAL PROBE TO MEASURE CONCRETE WORKABILITY, 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, pp.29-31 August 2012
- 2) Denis Beaupre: Mixer-Mounted Probe Measures Concrete Workability (IBB Probe data provide very good correlations with slump or flow tests), Concrete international, pp1-5, September 2012
- 3) 廣藤義和ほか: アジテータ車のドラム内に設置したプローブによる品質の連続管理の検討(その1~6)、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.333~344、2015.9

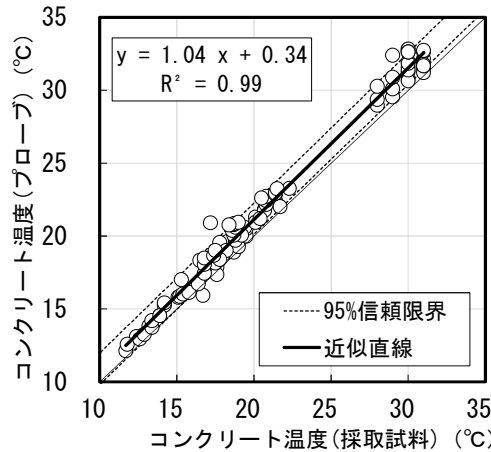


図13 コンクリート温度の比較(測定時期: 試料採取3分後)

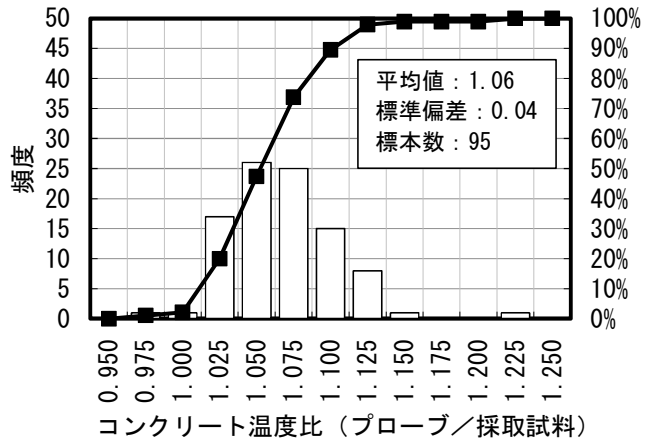


図14 コンクリート温度比の度数分布(測定時期: 試料採取3分後)

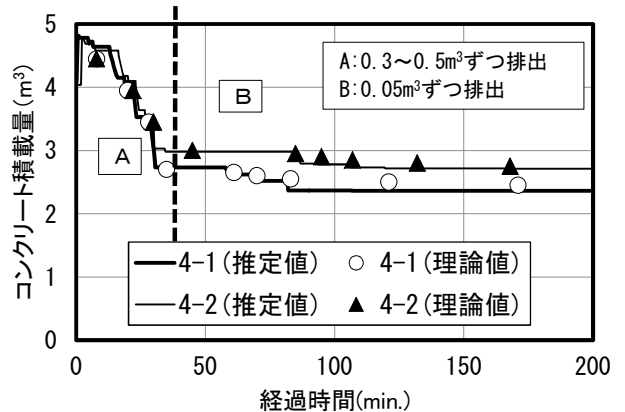


図15 コンクリート積載量の変動(実験IV)

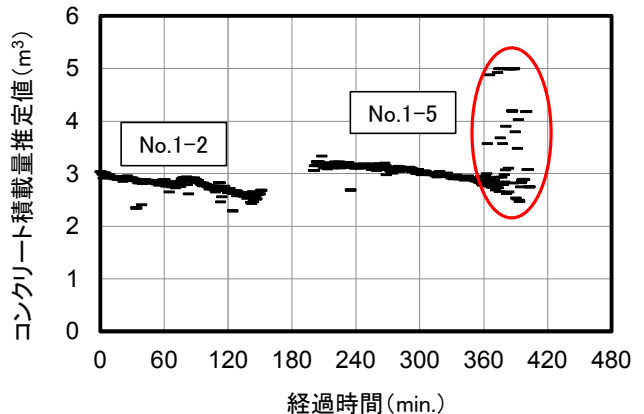


図16 同一車両のコンクリート積載量の連続推定結果