

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 Monitoring System for Fresh Concrete by Probe inside Drum

若林信太郎*1 原田尚幸*2 角田晋相*3

概 要

ひずみ計および温度計を内蔵したプローブをアジテータ車のドラム内部に取り付け、コンクリートの積込みから荷卸しまでのスランプ、温度および積載量を推定し、それら情報をリアルタイムに把握するコンクリート品質の連続管理システムの適用性について検討した。その結果、1)スランプとプローブ圧力には高い相関があり、それは指数関数の近似曲線で表現可能なこと、および、2)同システムによって、スランプ、コンクリート温度および積載量を連続記録および表示可能なため、出荷から荷卸しのリアルタイムの品質管理に有効と考えられることが、確認できた。

key words : 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は、一般的に、工程検査から現場到着後の経時変化を見込んだ配合計画が行われる。コンクリートのフレッシュ性状は運搬時間や気象条件により大きく変化するものの、運搬中の時系列の変動を把握することは、煩雑な作業を伴うため困難である。また、規格や設計図書等で定められるコンクリートの品質規定に対して、生産者側では工程検査と製品検査を行う、施工者側では施工現場に到着後の受入れ検査を行うことで判定するものの、いずれも代表的な試料の検査にとどまっているのが現状である。

そこで、アジテータ車のドラム内部に取り付けられたひずみ計および温度計を内蔵したプローブによって、スランプ、コンクリート温度、積載量等が計測できる技術^{1),2)}に着目し、連続管理の適用性について検討した³⁾。本報ではコンクリートの積込みから荷卸し地点までの運搬中のスランプ、コンクリート温度等のコンクリート品質が時系列で記録される同システムの有用性を検討するためにに行った実験結果をまとめた。

本研究は、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・間、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）により実施されたものである。

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ー部まで全長 420 mm であり、ひずみ計の内蔵された部分は $\phi 43$ mm でステンレス製の構造である。

図-2 に、システム構成図を示す。プローブ、データの記録保存兼表示装置（レシーバー）およびプローブへの給電ソーラーパネルの3つの部品で構成されたものがアジテータ車に装着される。



図-1 プローブの構造



図-2 システム構成図

*1 Shintaro WAKABAYASHI 本社技術本部技術研究所 主任研究員
*2 Naoyuki HARADA 本社技術本部技術研究所 主席研究員
*3 Shinsuke TSUNODA 本社技術本部技術研究所 主任研究員

2.2 推定原理

2.2.1 スランプ

アジテータ車の点検口よりドラム中心に向けて設置したプローブは、ドラムの回転とともに 360° 回転する。プローブがコンクリートに接触時に感知する圧力（プローブ圧力）とスランプの関係から作成した検量線を用いることで、推定スランプ値の記録および表示を行う。

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って計測される。

2.2.3 コンクリート積載量およびドラム回転数

図-3 に、積載量の計測方法の概要を示す。積載量は、ドラム内のコンクリートにプローブが触れるときの角度から推定する。ドラムの回転数は、同様にプローブの角度と時刻の関係から計算される。

積載量は、実験Ⅰ～Ⅲでは 3m³（練混ぜ量 1.5m³/バッチ ×2 バッチ）とし、実験Ⅳでは 4.5m³（練混ぜ量 1.5m³/バッチ ×3 バッチ）とした。

3.3 試験および測定

試験項目は、通常の品質管理で行われるもので、スランプ、スランプフロー、コンクリート温度、および空気量とし、練り上がり直後のみ強度試験用供試体採取した。プローブで得られるデータは、主にプローブ圧力、コンクリート温度、コンクリート積載量を連続記録した。

スランプ実測値には、同時に行った 2 組の平均値を mm 単位で丸めたものを適用した。測定は練上がりから最大 150 分後までに 30 分間隔で行った。その間プローブでは、データの連続測定を行った。待機中のドラム回転数は、No. 1-1～No. 2-8、No. 4-1 および No. 4-2 では約 2rpm とし、No. 3-1 および No. 3-2 では約 0.8 rpm とした。いずれの場合も試料採取前にドラムを高速攪拌した。

3. 実験概要

システムの適用性を確認するために、コンクリートやアジテータ車をパラメータとした実証実験を行った。

3.1 コンクリート

表-1 に、コンクリートの概要を示す。コンクリートは呼び強度が 24 から 60 の範囲の標準配合品とし、一部のコンクリートには流動化を施した。

3.2 アジテータ車およびコンクリート積載量

表-2 に、アジテータ車の諸元を示す。コンクリート



図-3 積載量の計測方法の概要

表-1 コンクリートの概要

実験	工場	時期	配合 No.	呼び方	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					流動化
							W	C	S	G	Ad	
実験Ⅰ	A	夏期	1-1	24-12-20N	58.4	43.6	155	265	824	1091	3.51 ¹⁾	—
			1-2	30-12-20N	51.8	42.4	155	299	789	1096	4.34 ¹⁾	60 分後
			1-3	30-18-20N	51.0	45.7	164	322	832	1010	2.90 ²⁾	—
			1-4	42-18-20N	39.9	41.8	171	429	715	1018	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	1012	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	1096	2.54 ¹⁾	—
			3-2	30-18-20N	51.8	45.8	167	322	829	1004	1.61 ²⁾	—
			3-3	30-8-20N	51.8	45.8	153	295	858	1037	2.51 ¹⁾	練上がり直後
			3-4	40-8-20N	39.0	37.5	156	400	665	1134	3.40 ¹⁾	練上がり直後
実験Ⅳ	A	冬期	4-1	24-8-20N	58.4	43.0	147	252	826	1121	2.14 ¹⁾	3)
			4-2	42-8-20N	37.4	37.0	156	417	652	1134	3.54 ²⁾	4)

1)AE 減水剤、2)高性能 AE 減水剤、3)積載量 4.5m³から 0.5m³ずつ排出し、3.0m³となった時点で流動化剤で流動化、4) 積載量 4.5m³から 0.5m³ずつ排出し、3.0m³になった時点より 1 時間経過後に加水により流動化

表-2 使用したアジテータ車の諸元

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
使用台数		2 台使用 (同型)	1 台使用	1 台使用	1 台使用
架装	メーカー	K 社製	K 社製	K 社製	K 社製
	型式	QDG-PW39L	KL-CW48A	ADG-CW4XL	QKG-CW5XL
	ドラム傾斜角度 (度)	16	16	16	16
	ドラム容量 (m ³)	8.9	8.7	8.7	8.3
シャシー	最大混合容量 (m ³)	4.5	4.4	4.4	4.2
	最大積載量 (kg)	10,960	9,710	9,710	9,470
	車両総重量 (kg)	19,970	19,930	20,000	19,940

4. 実験結果および考察

4.1 スランブおよびスランブフローの推定

4.1.1 推定式の構造と圧力記録時期の検討

図-4に実験Iで実施したNo. 1-1 (24-12-20N)の経過時間とプローブ圧力の関係を、図-5に、No. 1-1の1回目の試料採取前後のプローブ圧力の変化を示す。プローブ圧力は、試料採取に伴うドラム高速攪拌前後に変化し、高速攪拌直後(圧力II)に下がりながら、試料採取3分後(圧力III)に高速攪拌直前(圧力I)と同程度になった。スランブ推定値をプローブ圧力より求める場合、そのばらつきが推定精度を左右するため、スランブ推定に最適なプローブ圧力記録時期について検討する必要がある。

図-6に、実験I~IIIにおけるプローブ圧力I~圧力IIIと実測スランブの関係を示す。これらは工場や強度を区別せずに図示したものであり、いずれも低スランブほどプローブ圧力が大きくなるものの、その関係は全体的に指数関数の近似曲線で表すことができた。

表-3に、スランブの実測値と図-6の近似曲線から求

めたスランブの推定値との差を示す。両者の差は、圧力Iで最も小さい結果となったが、これは夏期に行った実験Iにおけるスランブの小さい範囲(120mm以下)でも、両者の差が比較的小さかったことによる。したがって、スランブの推定は、高速攪拌前のプローブ圧力(圧力I)と実測値の関係から、指数関数の近似曲線を推定式とすることで可能と考える。高速攪拌前の圧力で推定することは、待機中のアジテータ車において常時モニタリングも可能となり、実用的であると考えられる。

4.1.2 パラメータごとの誤差の検討

図-7に、工場、強度およびアジテータ車ごとのプローブ圧力Iと実測スランブの関係を示す。図-8に、指数近似曲線で推定したスランブと実測スランブとの誤差の分布を示す。なお、図-8では、データの少ないC工場の結果を除いている。

プローブ圧力Iと実測スランブの関係には、工場間の差異が認められず、同じ指数関数の近似曲線上に分布した。呼び強度については、低スランブデータの多い呼び強

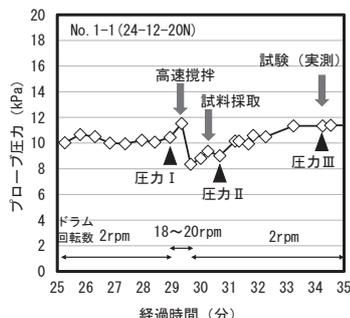
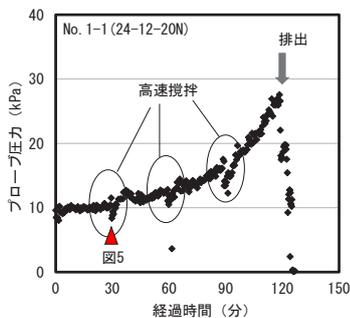


表-3 スランブの実測値と推定値の差

実測値と推定値の差	プローブ		
	圧力 I	圧力 II	圧力 III
最大値	+33mm	+29mm	+32mm
最小値	-33mm	-45mm	-41mm
平均値	0mm	0mm	0mm
標準偏差	13.4mm	16.7mm	16.2mm
n 数	79	83	81

図-4 プローブ圧力と経過時間の一例 (No. 1-1)

図-5 試料採取前後のプローブ圧力変化の一例

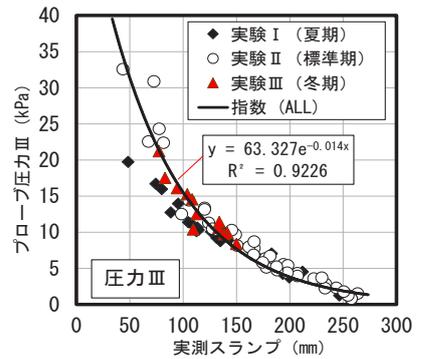
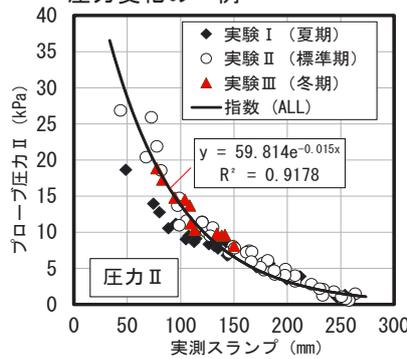
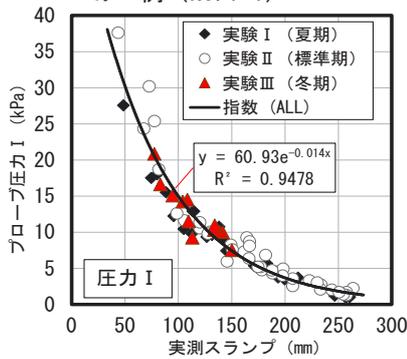
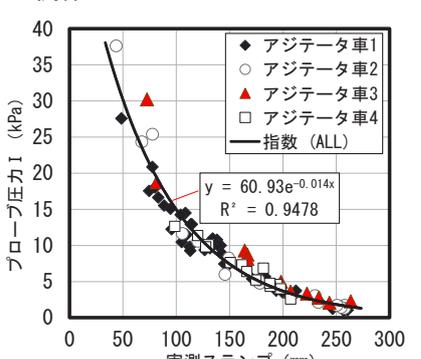
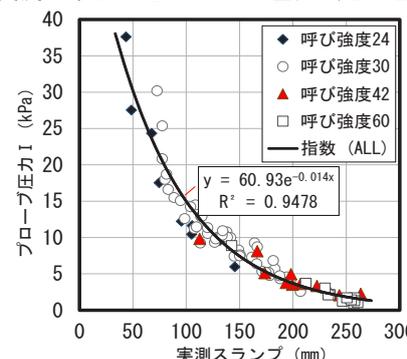
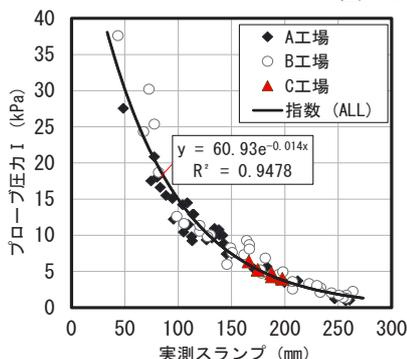


図-6 実測スランブとプローブ圧力 (I~III) の関係



(1) 生コン工場の比較

(2) 呼び強度の比較

(3) アジテータ車の比較

図-7 パラメータごとの実測スランブとプローブ圧力の関係

度 24 で誤差が比較的大きいものの、呼び強度ごとの明確な差異は認められず、プローブ圧力と実測スランプとの関係は同一近似曲線上に分布した。アジテータ車については、アジテータ車 3 では実測値が小さく推定されたものの、各車の誤差の変動は同等で、ドラムの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る。

以上の点から、本実験の範囲では、生コン工場、強度およびアジテータ車にかかわらず、プローブ圧力と実測スランプとの関係をひとつの指数関数の近似曲線に表すことで、スランプの推定式を作成できる。

4.1.3 スランプフローへの適用性

図-9 に、スランプフローの実測値とプローブ圧力の関係を示す。スランプとの関係同様に、圧力が小さいほどスランプフローが大きくなっており、適切な近似式を作成することによるスランプフロー推定の可能性はある。ただし、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ので、事前の入念なキャリブレーションテーブル調整が必要であると考えられる。

4.2 推定スランプの検証

4.2.1 アジテータ車ドラム回転数の影響

図-10 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、通常運搬中の 0.8rpm とした。プローブ圧力は、実測値と推定値との誤差が最も少なかったプローブ圧力 I で比較した。いずれの回転数でも、プローブ推定スランプと実測スランプは、スランプ約 80~180 mm 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、通常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。

4.2.2 推定スランプの連続データ

図-11 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値の経時変化を示す。スランプ低下の大小にかかわらず、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よく対応している。実測値は試料採取して試験を実施しないと確認できないが、プローブ推定値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考えられる。

4.2.3 経時変化の推定

図-12 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て経時変化の大きいケース、後者は出荷直後から徐々にスランプロスを生じるケースである。経時変化の推定には、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

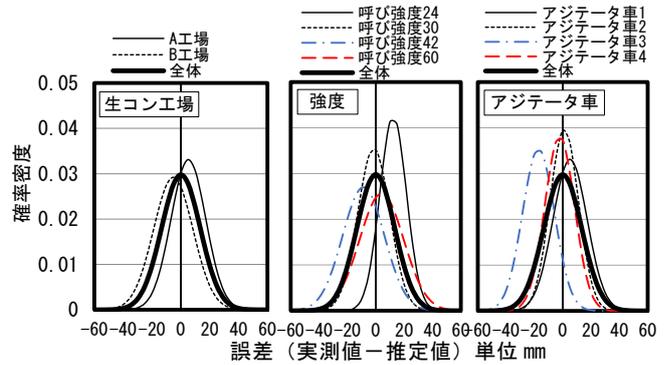


図-8 指数近似曲線の推定値と実測値の誤差

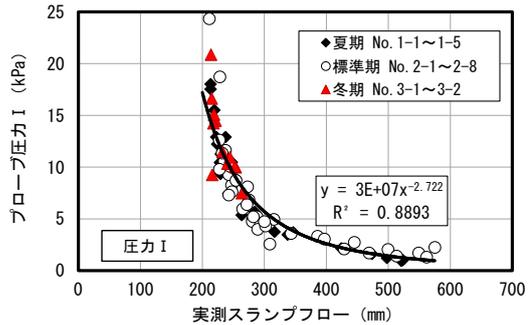


図-9 スランプフローとプローブ圧力の関係

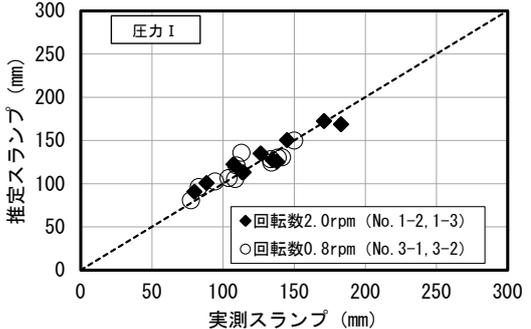


図-10 異なるドラム回転数による推定スランプ

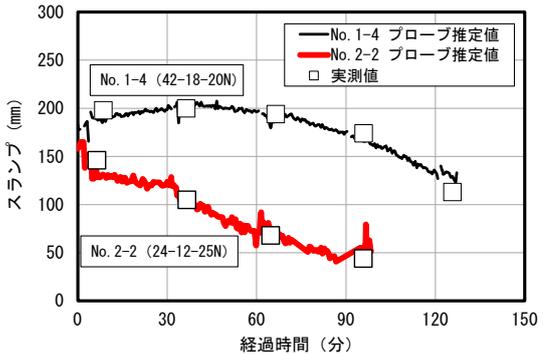


図-11 推定スランプと実測値の経時変化

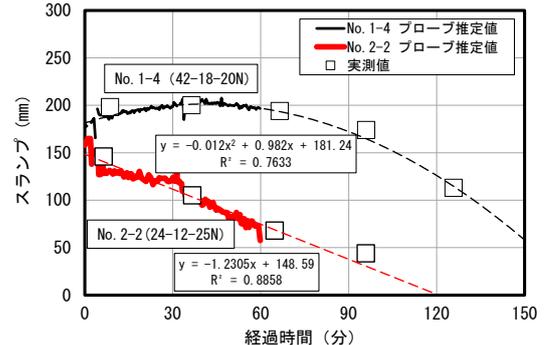


図-12 回帰式による経時変化の推定 (スランプ)

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。

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-13 に、プローブ計測値や試験用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、いずれも同様の変動傾向を示したものの、プローブの方が採取試料よりもやや高い結果となった。そこで、コンクリート温度について、プローブ計測値とドラム内部および試験用に採取した試料の実測値を比較した。

図-14 に、コンクリート温度について、プローブ計測値とドラム内部および採取試料の実測値の関係を示す。ドラム内部のコンクリート温度はプローブ計測値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値よりも低く、試料採取時にコンクリート温度の低下したことがわかる。したがって、プローブによって荷卸し時のコンクリート温度を推定する場合には、温度低下を考慮する必要がある。

図-15 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コンクリート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

比率は概ね一定であった。

図-16 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、プローブによってコンクリート温度を比較的高精度で推定可能と考える。

4.3.2 コンクリート積載量

図-17 に、コンクリート積載量の変動の一例として、実験Ⅳの結果を示す。積載量の推定値は、1 回あたりの試験時に 0.05m³ または 0.3～0.5m³ のコンクリート排出を仮定した場合の理論値と概ね一致した。このことから、プローブによってドラム内を目視確認することなく、コンクリートの積載量の推定が可能であると考えられる。

図-18 に、実験 I における同一車両のコンクリート積載量の連続推定結果を示す。ここでは、No. 1-5 (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変動した。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。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考える。

4.4 レオロジー定数の検討

コンクリートの荷卸し時には、材料を均一にさせるためにドラムを高速回転する。高速および低速のドラム回転時におけるプローブ圧力の差異から、コンクリートのレオロジー定数を算出可能となれば、本システムのポンプ圧送性など施工性評価への活用も期待できる。

そこで、実験結果をもとにレオロジー定数にあたる見

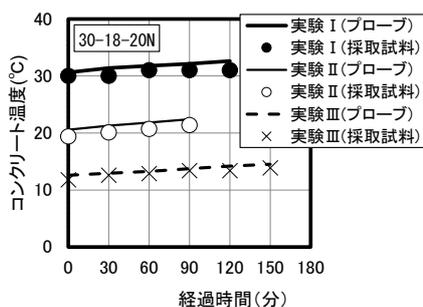


図-13 コンクリート温度測定結果の一例 (30-18-20N)

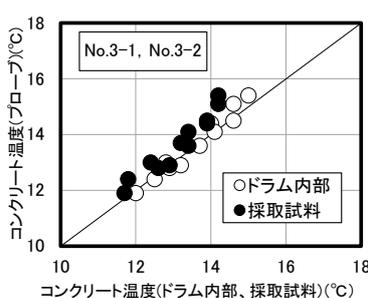


図-14 測定箇所別のコンクリート温度

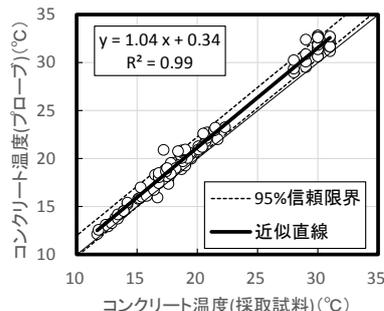


図-15 コンクリート温度の比較 (測定時期：試料採取 3 分後)

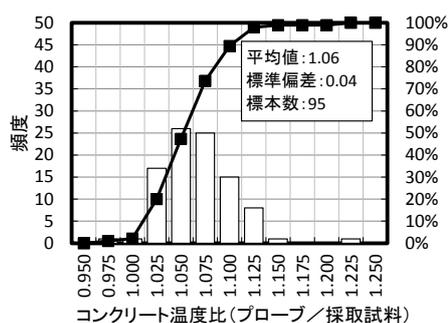


図-16 コンクリート温度比の度数分布 (測定時期：試料採取 3 分後)

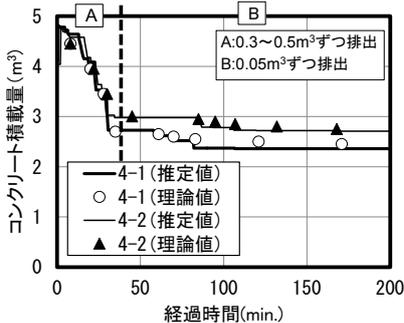


図-17 コンクリート積載量の変動 (実験Ⅳ)

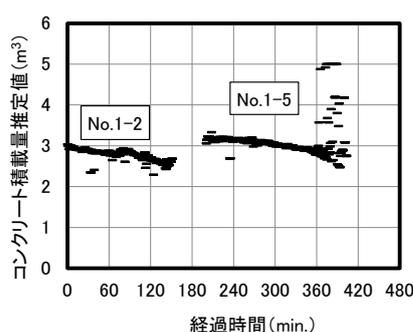


図-18 同一車両のコンクリート積載量の連続推定結果

かけの塑性粘度や見かけの降伏値の算出を試み、これらが算出可能なスランプ条件などを整理する。

4.4.1 レオロジー定数の算出方法

図-19に、レオロジー定数の算定方法を示す。コンクリートの見かけの塑性粘度ならびに降伏値は、既往の研究⁴⁾を参考に、プローブ圧力(P)を横軸、ドラム回転数(N)を縦軸として、最小二乗法によって直線式(1)を求め算出する。ただし、ここでは高速回転時とその後の低速回転時の回転数と圧力の2点から求めた。なお、高速回転時の圧力が低速回転時よりも小さくなった場合や圧力差が0.5kPa未満と小さい場合などは計算不可とした。

$$P = \tau_y + \eta N \quad \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

ここに、P：プローブ圧力(kPa)

N：ドラムの回転数(min⁻¹)

τ_y ：見かけの降伏値(kPa)

η ：見かけの塑性粘度(kPa・min)

4.4.2 算定結果

(1)スランプと見かけの塑性粘度計算の可否について

図-20に、実測スランプと見かけの塑性粘度の計算可否の度数を示す。その結果、スランプが15cm未満では計算不可となる場合が多くなった。また、比較的少ないもののスランプが20cmを超えるもので計算不可とあるのは、見かけの降伏値が負側となったためである。

(2)低速回転時の圧力と降伏値ならびに塑性粘度

図-21に、実験I～IVの低速回転時のプローブ圧力と、見かけの降伏値および塑性粘度との関係を示す。見かけの降伏値は低速回転時の圧力と比較して約4.3%小さい値であり相関が高いものの、見かけの塑性粘度は低速回転時の圧力との相関がみられない。

(3)計測事例(実験IV)

図-22に、スランプとレオロジー定数の関係の一例として実験IVの結果を示す。いずれの呼び強度とも、スランプの増加とともに見かけの降伏値が小さくなった。見かけの塑性粘度は、W/Cの低いNo.4-2の方がNo.4-1よりも大きくなった。なお実験IVでは、加水や流動化剤添加によってスランプを増加させているが、実験の範囲では見かけの塑性粘度とスランプに相関はみられなかった。

5. まとめ

ひずみ計および温度計を内蔵したプローブをアジテータ車のドラム内部に取り付けたコンクリート品質の連続管理システムに関する適用性を検討した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 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に表すことで、スランプの推定式を作成できる。
- 2) 推定スランプと経時変化から得られる回帰式により経時変化の推定が可能となると考えられる。

- 3) 本システムにより、コンクリート温度やコンクリート積載量の推定も可能となる。
- 4) スランプが15cm程度以上であれば、プローブを用いてコンクリートのレオロジー定数を算出可能なことが示唆される。

【参考文献】

- 1) Denis Beaupre : RHEOLOGICAL PROBE TO MEASURE CONCRETE WORKABILITY, 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 29-31 Aug. 2012
- 2) Denis Beaupre: Mixer-Mounted Probe Measures Concrete Workability (IBB Probe data provide very good correlations with slump or flow tests) , Concrete international, pp2-5, Sep. 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コンクリート品質の連続管理の検討(その1~6), 日本建築学会学術講演梗概集, 2015.9
- 4) 和美広喜ほか：高強度コンクリートの流動特性に関する実験的研究, コンクリート工学論文集 Vol.4, No.1, 1993.1

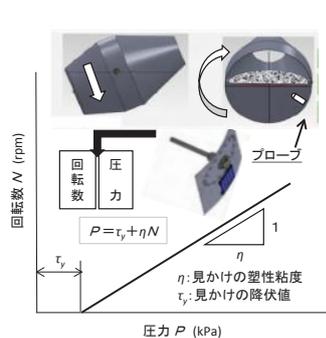


図-19 レオロジー定数の算定方法

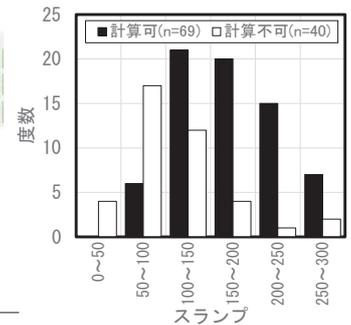
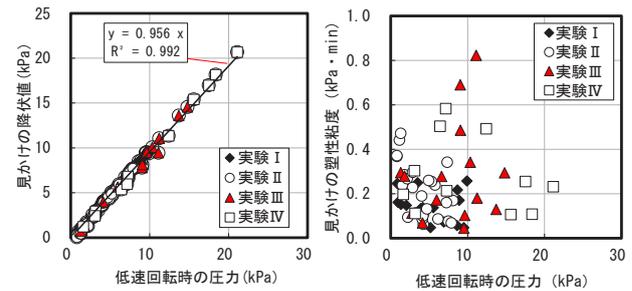
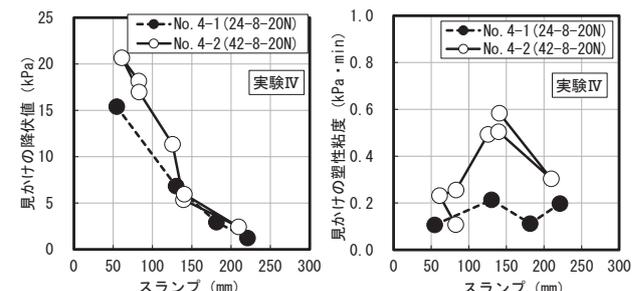


図-20 見かけの塑性粘度の計算可否の度数



(1)見かけの降伏値 (2)見かけの塑性粘度

図-21 レオロジー定数と低速回転時の圧力



(1)見かけの降伏値 (2)見かけの塑性粘度

図-22 レオロジー定数とスランプ(実験IV)