

普通コンクリートに区分される高流動コンクリートの施工性能評価

An Evaluation for workability of high fluidity concrete using air-entraining and high-range water-reducing admixture containing viscosity modifying agent

藺井孫文*1

概 要

運搬中のコンクリートのフレッシュ性状を連続的かつ高精度に推定可能であるコンクリートの連続品質管理装置（ドラム内部にプローブを装備したアジテータ車）を用いて、普通コンクリートに区分される増粘剤含有高性能 AE 減水剤を使用した高流動コンクリートの施工性能を評価した。その結果、増粘剤含有高性能 AE 減水剤を使用した高流動コンクリートは、これまで評価したコンクリート（中・高流動コンクリート含む）と同様、プローブ圧力とスランプフローや J リングフローとの間に強い相関関係があり、プローブ圧力による試験値推定から施工性能が評価できることがわかった。

key words : 増粘剤含有高性能 AE 減水剤、高流動コンクリート、プローブ圧力、J リングフロー試験

1. はじめに

2018年に打込みの作業の合理化、高密度な配筋のコンクリート構造物の充填性の改善などを目的に、JIS A 5308の普通コンクリート区分（呼び強度 27~45）にスランプフロー450、500、550、600mmが追加された。また、高流動コンクリートの流動性や間隙通過性などを評価する試験の1つとして、JIS A 1159：コンクリートの J リングフロー試験方法が追加された。ここで対象としている高流動コンクリートは、増粘剤含有高性能 AE 減水剤（以下、VSPと称す）を用いた一般的な強度レベル（24~45N/mm²程度）のスランプフロー500mm以上の高流動コンクリート（単位結合材量 500kg/m³以下）であり、既往の粉体系、増粘剤系、併用系の高流動コンクリートが志向した締固め不要の自己充填性は必須ではなく、施工性がよく流動性の高いコンクリートである。適用部位は、スランプコンクリートでは充填が困難な箇所に加え、工事の省力化、合理化ならびに締固め作業に伴う騒音・振動の発生の抑制等に効果が期待される部位・部材である。そして、この高流動コンクリートの性能評価試験方法として J リングフロー試験がある。

一方、運搬中のコンクリートのフレッシュ性状を連続的かつ高精度に推定可能であるコンクリートの連続品質管理装置として、歪みゲージを内蔵する圧力検知可能なプローブを装備したアジテータ車がある^{1), 2), 3)}。しかし、普通コンクリート区分の高流動コンクリートのプローブ圧力とスランプフロー、J リングフロー等との関係は明

確になっていない。

そこで、普通コンクリートに区分される高流動コンクリートのプローブ圧力とスランプフローとの相関および J リングフロー試験による評価指標との関連性を得るため、経時変化の大きくなる酷暑期に比較実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 実験に用いた高流動コンクリート

実験に用いた高流動コンクリートは普通強度領域のスランプフロー550mmまたは600mmとし、材料分離抵抗性は増粘剤の作用によるもの、粉体量によるものをそれぞれ異なる強度の2調合（呼び強度 30 および 36）の全4調合とした。分離抵抗性を確保するための混和剤は、VSP（調合記号に T を追記）を使用した。使用材料を表-1に、コンクリート調合を表-2に示す。

表-1 使用材料

材料名	記号	密度	種類・生産者・産地等	調合No.
セメント	C	3.16	普通ポルトランドセメント	1~4
細骨材	S	2.64	混合砂(富津産55%・仁淀川町産25%・伊勢町産20%)	
粗骨材	G	2.70	高知県吾川郡仁淀川町産 碎石 2005 実績率64.0%	
水	W	1.00	地下水	
混和剤	SP	1.02~	高性能AE減水剤 標準型 I 種	1,2
		1.11	(VSP,増粘剤一液型)	
		1.05~	高性能AE減水剤 標準型 I 種	3~4
1.08	(揭示終了後の後添加,調合No.3)			

*1 Magofumi SONOI

技術本部技術研究所 主任研究員

表-2 コンクリートの調合

No.	調合記号*1	呼び強度	練直目標SF (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					材齢28日圧縮強度 (N/mm ²)	
							W	C	S	G	SP	経時0分	材齢60分
1	30-55T	30	550	4.5	51.0	50.0	175	343	885	907	4.80	33.3	33.0
2	36-55T	36	550	4.5	44.0	48.6	175	398	840	907	5.57	47.7	45.5
3	36-55	36	550	4.5	44.0	48.6	175	398	840	907	3.98	41.8	40.6
4	45-60	45	600	4.5	38.1	47.1	175	459	788	907	4.59	47.2	45.9

(*1 T:増粘剤含有高性能AE減水剤(VSP)増粘剤一液型)

2.2 実験方法および試験項目

高流動コンクリートは4調合とも4.75m³製造し、プローブを設置したアジテータ車に積載した。コンクリートは最大120分まで経時変化させ、この間のプローブ圧力や温度などの連続データを収録するとともに、30分間隔で採取した試料についてはスランブフローやコンクリート温度など試験した。アジテータ車の待機中は、ドラム回転速度を2rpmに保持した。スランブフローの推定に用いたプローブ圧力は、既報²⁾のスランブ推定と同様に、試料排出直前のボトム（ドラム底部）を通過する際の計測値を採用した。なお、No.3およびNo.4（増粘剤無）では、スランブフローの低下後、高性能AE減水剤を後添加し、回復したスランブフローとプローブ圧力との関係も確認した。また、Jリングフロー試験を行い、これから得られた流動性や間隙通過性の指標とプローブ圧力との関連性についても検討した。試験項目を表-3に示す。



写真-1 コンクリート連続管理装置

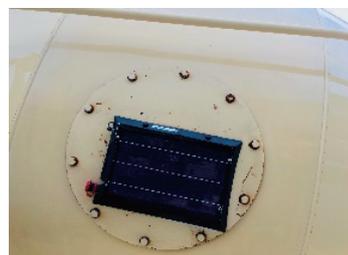


写真-2 ソーラーパネル



写真-3 プローブ

表-3 試験項目

1	スランブフロー	JIS A1150
2	温度測定	JIS A1156
3	空気量試験	JIS A1128
4	圧縮強度試験	JIS A1108
5	Jリングフロー試験	JIS A 1159/JIS A 1160

2.3 新型プローブおよび装置の構成

アジテータ車のドラム内部に取り付けたプローブによるコンクリート連続管理装置の外観を写真-1に示す。装置の構成および測定原理については既報²⁾に詳細を記したが、今回の実験に使用した装置は各種試験運用を踏まえて、耐久性、測定性能およびメンテナンス性を向上させた新型である。点検口を利用して電源供給バッテリーと通信機器を内蔵したソーラーパネルとの一体ユニット（写真-2）と圧力や温度の測定性能向上が計られたプローブ（写真-3）を取り付け、このユニットからBluetooth接続でレシーバ（写真-4）にスランブ推定等のデータを表示し、有線接続の「I/O box」からWi-Fi接続で4Gの通信回線にて汎用タブレット（写真-5）からサーバーにアップロードされる。それらのデータはネット環境の下IDとパスワードでどこからでも確認、ダウンロードを可能とした装置である。



写真-4 レシーバ Box



写真-5 汎用タブレット

2.4 Jリングフロー試験の概要

高流動コンクリートの流動性や間隙通過性などを評価する試験のひとつとして、JIS A 1159：コンクリートのJリングフロー試験方法が制定され、この試験方法によるJIS A 1160：増粘剤含有高性能AE減水剤を使用した高流動コンクリートのワーカビリティの評価基準が示された。試験器具の外観を写真-6に、試験状況を写真-7に示す。本評価基準では、材料分離抵抗性は試験後のフレッシュコンクリートの状態を目視によって観察し、「分離していない/分離している」を判定するとともに、流動性と間隙通過性は表-4、5にそれぞれ示す評価基準によって評価することが規定されている。間隙通過性の評価指標であるPJ値、ブロッキング (B) 値は式(1)、(2)で求められる。

$$PJ = (\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})/4 - \Delta h_0 \quad (1)$$

ここに、

PJ：Jリングフローの通過能力 (mm)

Δh_0 ：コンクリート中央部の高さ (mm)

$\Delta h_{x1, x2, y1, y2}$ ：Jリング外のコンクリートの高さ (mm)

$$B = SF - SF_j = (d_1 + d_2)/2 - (j_1 + j_2)/2 \quad (2)$$

ここに、

B：ブロッキング値 (mm)

SF：スランプフロー (mm)

SF_j ：Jリングフロー (mm)

d_1 ：SF試験後のコンクリートの広がり最大径 (mm)

d_2 ： d_1 と直交する方向の直径 (mm)

j_1 ： SF_j 試験後のコンクリートの広がり最大径 (mm)

j_2 ： j_1 と直交する方向の直径 (mm)

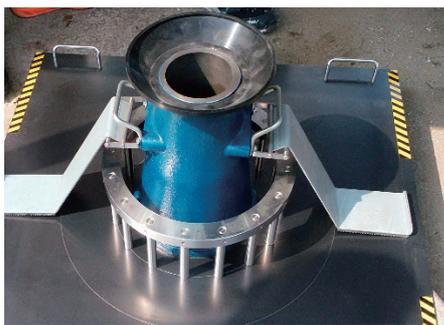


写真-6 Jリングフロー試験器具



写真-7 Jリングフロー試験状況

表-4 流動性の評価基準 (JIS A 1160)

評価項目	目標SF	流動性の評価基準
スランプフロー値(SF)	500mm	±75mm
	600mm	±100mm
500mmフロー到達時間(Tsec)	600mm	10秒以下

表-5 間隙通過性の評価基準 (JIS A 1160)

評価項目	目標SF	間隙通過性の評価基準
Jリングフローの通過能力(PJ値)	500mm	60mm以下
	600mm	40mm以下
ブロッキング値(B値)	—	75mm以下

3. 実験結果と考察

3.1 フレッシュ性状

実測によるスランプフローの経時変化を図-1に示す。暑中に実験を行ったため、セメント量および増粘剤の有無にかかわらず全ての調合でスランプフロー値が経時とともに小さくなったことが確認できた。空気量の経時変化を図-2に示す。空気量については経過時間による傾向は観られないためスランプフローの経時変化に空気量による影響は無視できるものとして考えた。なお、今回実験対象とした各調合の材齢28日圧縮強度(標準養生)は表-2に示した通りいずれも呼び強度以上であった。

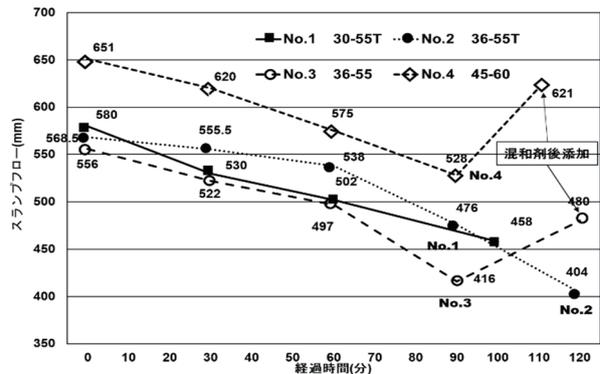


図-1 スランプフローの経時変化

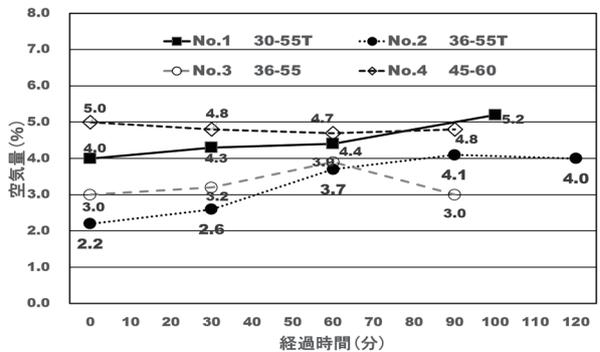


図-2 空気量の経時変化

3.2 スランプフローとプローブ圧力の関係

スランプフローとプローブ圧力の関係を図-3に示す。ここに、横軸のスランプフローは試料の実測値である。スランプフローが500mmより大きな範囲において、同一スランプフローに対するプローブ圧力の関係は、VSPの使用有無によって傾向がやや異なり、コンクリートの粘性の違いによるものと推察される。そこで、VSPを用いたNo.1およびNo.2、VSPを用いていないNo.3およびNo.4の各2調査に分け、既報²⁾と同様に指数近似曲線で表し、その相関性について検討した。4調査全体における相関係数0.85に対し、VSPの有無で区別した場合はVSP有で0.91、VSP無で0.95となり、VSPの使用有無を区別することで相関性が高まることが確認された。また、高性能AE減水剤の後添加によって、スランプフローを回復させたコンクリートもスランプフローとプローブ圧力の関係で表した指数近似曲線上にほぼ打点された。今回の実験の範囲においては後添加で流動化したコンクリートのスランプフロー推定にも同じ近似式での対応が可能であった。

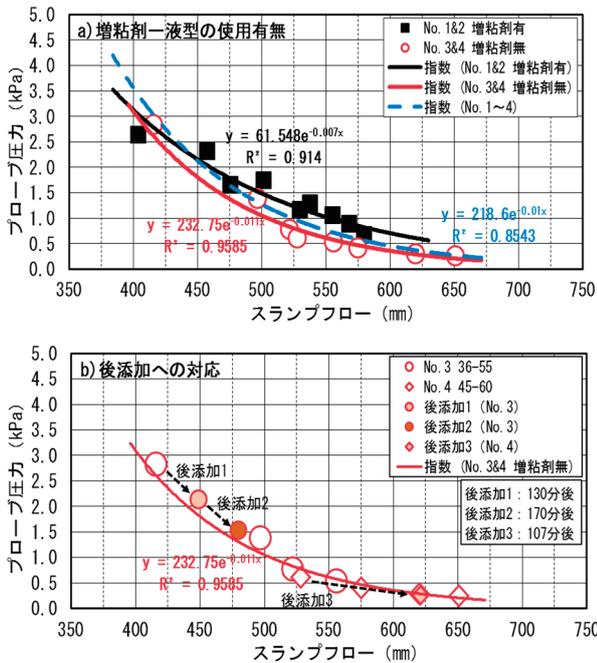


図-3 スランプフローとプローブ圧力の関係

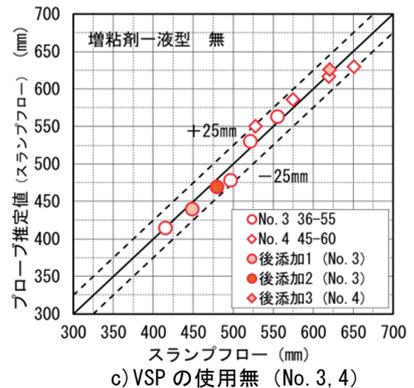
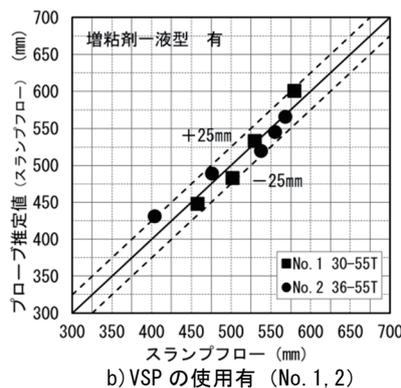
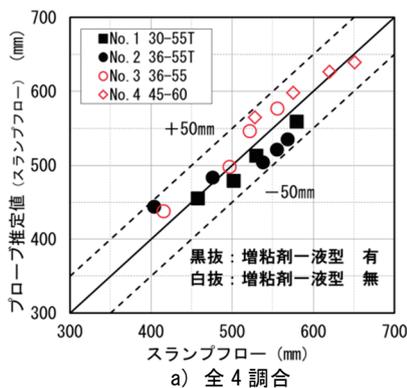


図-4 スランプフローとプローブ推定値の比較

3.3 スランプフローの推定精度

全4調査ならびにVSPの使用有無で区別した場合の指数近似式を用いて、プローブ圧力からスランプフローを推定し(以降、プローブ推定値とする)、荷卸し試料のスランプフロー試験値と比較検証した。実測スランプフローとプローブ推定値の関係を図-4、スランプフローの推定精度を表-6に示す。VSPの使用有無を区別せず、全4調査の指数近似式を用いた場合、概ね±40mmの範囲に入る結果であるが、VSPの有無を区別することで誤差が小さくなり、概ね±25mm程度の高い精度で推定可能となった。このように高流動コンクリートのスランプフローを推定する場合は、VSPの有無を区別して相関関係を確認した上で、プローブ圧力からスランプフローに換算することが推定精度の向上に有効である。また、高性能AE減水剤の後添加して流動性を高めたコンクリートについても、後添加前のものと同様に高い精度でスランプフローの推定が可能であるため、現場で流動化したコンクリートを管理する場合のベースコンクリートや流動化後の性状を荷卸しせず、確認できる可能性が示唆された。

表-6 スランプフローの推定精度

調査	誤差 mm (実測-推定)		標準偏差 mm	データ数	
	最大	最小			
VSP	有(2調査)	27	-20	16.9	9
	無(2調査)	22	-22	14.9	8
	無(後添加)	11	-5	8.8	3
全体(4調査) ^{注)}	40	-35	25.0	17	

注)VSP無(後添加)除く

3.4 Jリングフロー試験結果とプローブ圧力の関係

Jリングフロー試験結果とプローブ圧力との関係を図-5~7に示す。ここでのプローブ圧力は、ドラム底部で得られた数値を用いている。プローブ圧力とJリングフローは、スランプフローと同様に強い相関が認められた。また、流動時間やPJ値は、プローブ圧力と弱い相関ではあったが関係がみられた。なお、PJ値は文献²⁾よりスランプフローが小さくなるにつれて数値が大きくなること示されており、図-8からも同様の傾向がみられる。

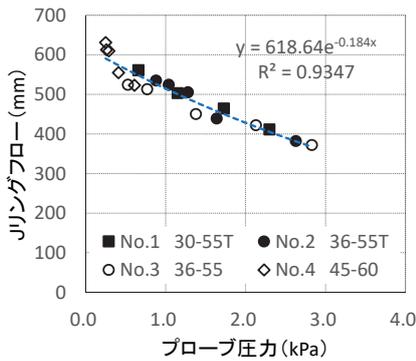


図-5 プローブ圧力と J リングフロー

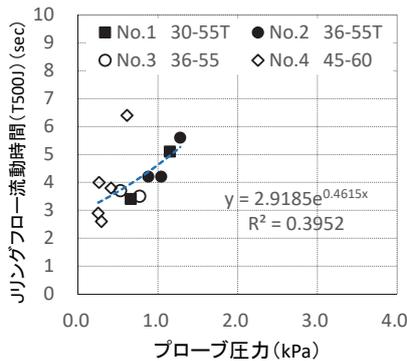


図-6 プローブ圧力と J リングフロー流動時間

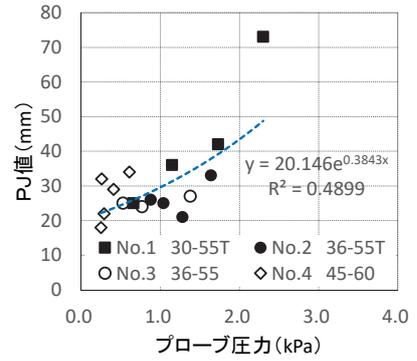


図-7 プローブ圧力と PJ 値

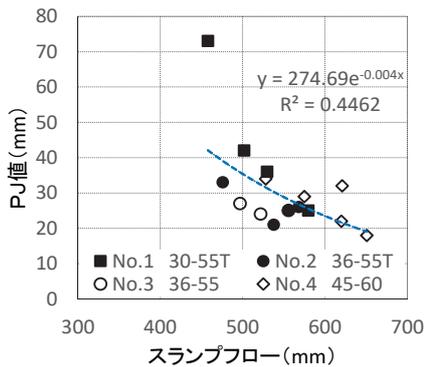


図-8 スランプフローと PJ 値

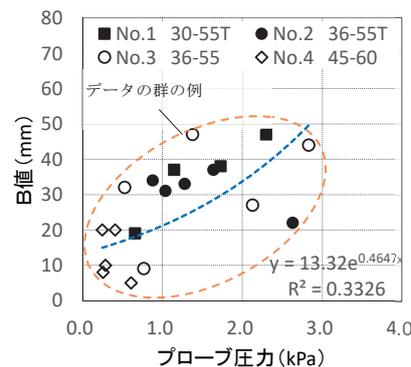


図-9 プローブ圧力と B 値

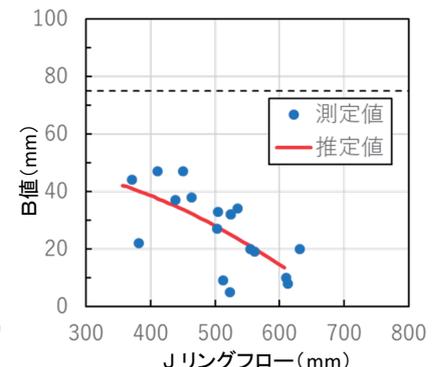


図-10 J リングフローと B 値

プローブ圧力と B 値の関係を図-9 に示す。B 値は、式(2)よりスランプフローと J リングフローの差として求められる。スランプフローおよび J リングフローは、プローブ圧力と強い相関があるものの、B 値はこれらと桁数が異なるため、プローブ圧力との関係が明確ではなくなるが、データの群を形成している。なお、今回の実験で B 値は、図-10 に示すようにでは間隙通過性の評価基準である 75mm 以下を満足していた (プローブ圧力が 3kPa 以下)。

3.5 レオロジー定数とプローブ圧力の関係

4種類の高流動コンクリートを対象に、プローブがドラムの中速および低速回転におけるコンクリート内へ侵入・接触した際の測定したプローブ圧力から見かけの塑性粘度やせん断降伏値を算出し、それらの経過時間による推移やスランプフローとの関係について検討した。

ここでは、抽出した代表的な中速と低速回転時の平均の回転数と圧力値の 2 点からフレッシュコンクリートのレオロジー定数、すなわちコンクリートの見かけの塑性粘度および見かけのせん断降伏値を、図-11 に示すように式(3)を求めて算出した²⁾。

$$P=g+hN \quad (3)$$

ここに、

P：プローブの圧力 (kPa)

N：ドラムの回転数 (min⁻¹)

h：コンクリートの見かけの塑性粘度 (kPa・min)

g：コンクリートの見かけのせん断降伏値 (kPa)

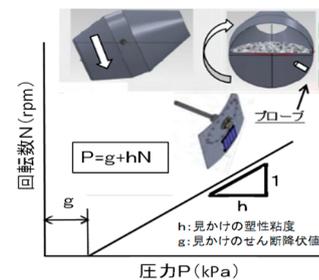


図-11 粘度測定方法¹⁾

(1) 見かけの塑性粘度

スランプフローと塑性粘度の関係を図-12 に示す。スランプフロー450～580 mmの範囲では、No. 1 (W/C=51%、VSP) の塑性粘度は 0.14～0.17kPa・min であり、No. 2 (W/C=44%、VSP) のそれは 0.21～0.23kPa・min であり、それぞれスランプフローの違いで塑性粘度は大きく変わらない結果となった。一般に水セメント比が小さいほど粘度は大きいことから、両者の塑性粘度の大小関係は妥当であったと考えられる。また、同一水セメント比の No. 2 と No. 3 (W/C=44%、SP) を比較すると、No. 3 のスランプフロー 522 mm を除けば、No. 3 の塑性粘度が小さいことから、No. 2 の増粘剤による粘度付与効果がプローブによる粘度測定において確認できたと考えられる。

また、No. 4 (W/C=38.1%、SP) は、スランプフロー620 mm (経過時間 30 分) を除くと、スランプフロー530～580 mm

の範囲の塑性粘度は増粘剤による粘度を付与した No.2 (W/C=44%) とは同程度であった。No.4 のスランブフロー651 mmの塑性粘度はスランブフロー530~580 mmのそれと大差がないことから、スランブフロー650 mm程度でも材料分離抵抗性は大きな差がないコンクリートであったものと思われる。一方、No.2 では概ねスランブフロー450 mm未満、No.3 ではスランブフロー500 mm未満において、塑性粘度は増粘剤による粘度付与の有無にかかわらず、スランブフローが低下すると小さくなる傾向を示した。

以上のように、プローブのコンクリートに進入する際のドラムの中速と低速回転時の圧力測定により、一定範囲のスランブフローにおいて、水セメント比の違いや増粘剤による粘度付与の違いについて、見かけの塑性粘度が測定できているといえる。

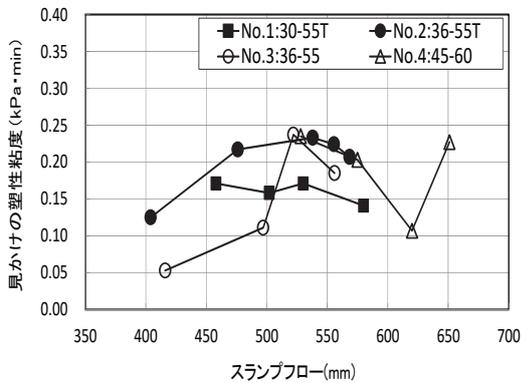


図-12 スランブフローと見かけの塑性粘度

(2) 見かけのせん断降伏値

スランブフローとせん断降伏値（以下、降伏値と称す）の関係を図-13 に示す。いずれの調査もスランブフロー475~500 mm程度に低下するまでは降伏値は同程度ないしは漸減し、その後のスランブフローの低下にもない、急激に大きくなる傾向を捉えていた。スランブフロー550 mm 付近で比較すると、増粘剤による粘度付与した調査の降伏値の方が粘度付与しないものと比較して大きい値であったが、水セメント比の違いは明確でなかった。

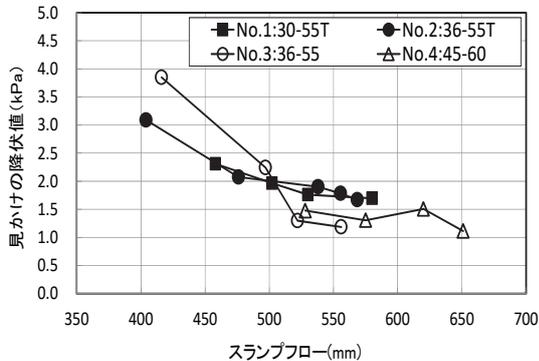
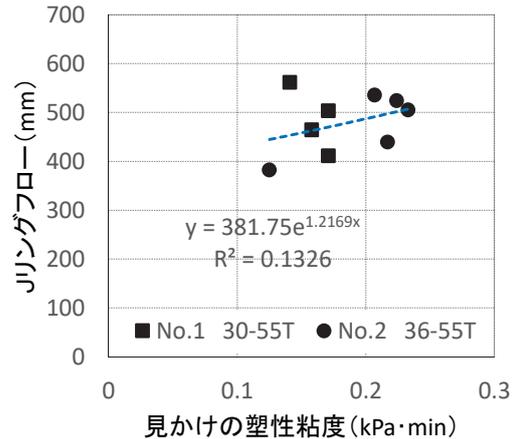


図-13 スランブフローと見かけの降伏値

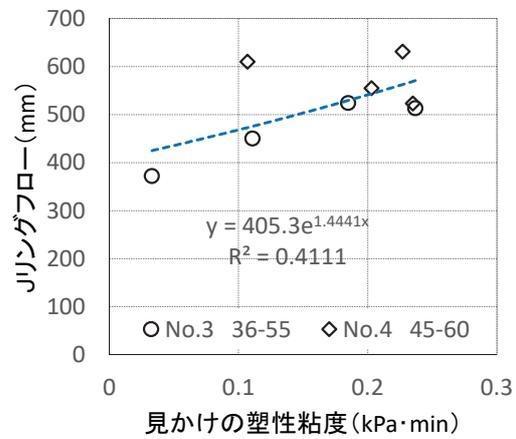
(3) Jリングフローとレオロジー定数との関係

Jリングフローとプローブ圧力から求めた見かけの塑性粘度との関係を図-14、15に、またせん断降伏値との関係を図-16、17に示す。Jリングフローは見かけの塑性粘度とともに大きくなる傾向がみられたものの明確ではなかった。一方で、見かけのせん断降伏値との関係では、それが大きいほどJリングフローは小さくなる、やや強い相関関係がみられた。これよりJリングフロー値は、見かけの降伏値からも推定できる可能性が示唆された。

以上より、アジテータ車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装置を用いることで、容易にアジテータ車積載の高流動コンクリートの品質をレオロジー定数と関連付けて、取得できる可能性が示唆された。ただし、ドラム内を回転するプローブ圧力変化の様子は、スランブフロー500 mmを境に異なってくること、また小さいスランブフローではドラム回転速度が速くなるとブレードの動きによって上下、前後に移動しやすくなると考えられるため、本装置による小さいスランブフローの粘度測定では注意が必要であると考えられる。



見かけの塑性粘度 (kPa·min)
図-14 見かけの塑性粘度と Jリングフロー (No. 1, No. 2)



見かけの塑性粘度 (kPa·min)
図-15 見かけの塑性粘度と Jリングフロー (No. 3, No. 4)

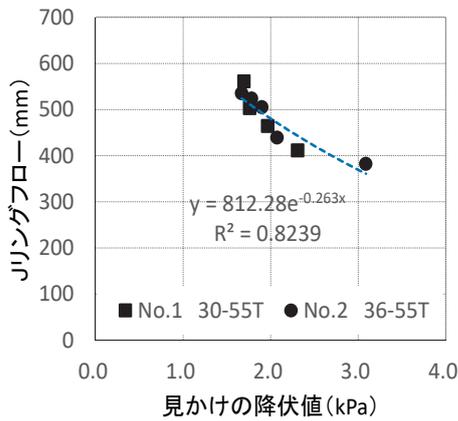


図-16 見かけのせん断降伏値と Jリングフロー (No. 1, No. 2)

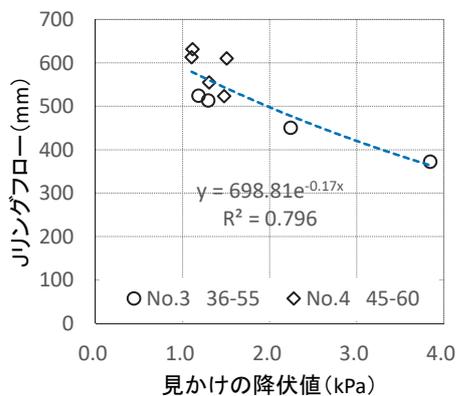


図-17 見かけのせん断降伏値と Jリングフロー (No. 3, No. 4)

4. まとめ

アジテータ車に設置したプローブにより普通コンクリートに区分される高流動コンクリートのスランプフロー、Jリングフロー等の施工性能評価を行った結果、下記の知見が得られた。

- ①スランプフローは、スランプ同様にプローブ圧力との関係を指数近似で表すことができ、プローブ圧力から推定することができる。普通コンクリート区分における高流動コンクリートのスランプフローについては、VSPを区別することで推定精度が向上する。
- ②プローブシステムによる自動での状態監視は、経時変化に伴うスランプフローの変化や高性能 AE 減水剤を後添加して回復させた場合にもリアルタイム表示で認識可能であるため、出荷から荷卸しまでの品質管理ならびに後添加の際の試験の省力化にも有効であると考えられる。
- ③プローブ圧力から算出した見かけの塑性粘度やせん断降伏値は、一定範囲のスランプフローで粘度の大小関係を捉えていた。また、プローブ圧力と Jリングフローは強い相関がみられた。更なるデータの蓄積により、プローブ圧力による試験値推定からの施工性能評価における可能性を示唆した。

【謝辞】

本報は、Probe システム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 11 社 (青木あすなろ建設、淺沼組、安藤・間、大木建設、鹿島建設、鴻池組、清水建設、銭高組、東亜建設工業、東洋建設、戸田建設) およびプローブシステムの発案者である Denis Beaupre (Director of Science and Engineering)、Xavier Berger (PhD student) および Marc Jolin (Professor) らによる協力によって実施された実験結果をまとめ、2020 年度日本建築学会学術講演梗概集に掲載された報文を再編集したものである。関係各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) Denis Beaupre: RHEOLOGICAL PROBE TO MEASURE CONCRETE WORKABILITY, The 37th Conference on Our World in Concrete & Structure 29-31 August 2012, Singapore
- 2) 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 ~ その 6)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2015.9
- 3) 若林信太郎: アジテータ車ドラム内設置のプローブによるコンクリート施工性能評価、銭高組技報 No. 42、pp. 9-14、2017. 11
- 4) 廣藤義和、毛利彰仁、山田雅裕、安田正雪、柳田淳一ほか: アジテータ車に設置したプローブによる普通コンクリートのスランプフローの連続管理 (その 1 ~ その 5)、日本建築学会学術講演梗概集、2020. 8

