

論文 動画像分析を活用したフレッシュコンクリートの性状判定手法に関する研究

倉田 和英*1・松本 修治*2・橋本 学*3・柳井 修司*4

要旨：コンクリートの全量受入れ検査により初期欠陥の発生リスクが高いコンクリートを排除することを目的として、動画像分析を活用したコンクリートの性状判定手法を考案した。考案した手法は、アジテータ車のシュートを流下するコンクリートの流動勾配からワーカビリティを良否判定するものであり、基礎実験および施工実験を通じて、スランプとシュートを流れるコンクリートの勾配の積分値に高い相関があることが確認された。

キーワード：受入れ検査, 動画像分析, フレッシュコンクリート, スランプ, 流動性

1. はじめに

コンクリートの品質管理・検査においては、構造物に致命的な豆板や空洞等の初期欠陥を生じるリスクの高いコンクリートを確実に排除することが重要である。一般に、スランプ試験等のコンクリートの受入れ検査は、20～150m³に1回の頻度¹⁾での抜取りで行われる。しかしながら、検査を受けなかった要求性能を満足しないコンクリートや検査を受けたものでも時間経過に伴って所要のワーカビリティを失ったコンクリートを打ち込んでしまう場合もあり、その場合には、圧送配管の閉塞や充填不良を引き起こす可能性がある。

一方で、国土交通省が掲げる「i-Construction」²⁾の施策において、ICTの活用により発注者が行う検査の省力化を進めている一方で、施工者が実施する品質管理のうち、コンクリートの受入れ時の品質管理・検査についても品質を確保した上で、省力化、さらには自動化する技術が望まれている。

筆者らは、コンクリートの性状を全数かつリアルタイムに品質管理・検査する技術の一つとして、アジテータ車のシュートを流下するコンクリートの動画から、コンクリートのワーカビリティの良否を全量で判定する手法について検討している³⁾。本報では、この手法の適用性について実施した基礎実験および実規模の施工実験における検証結果について述べる。

2. 動画像分析による全量受入れ検査

2.1 本技術の概要

フレッシュコンクリートのワーカビリティは、主にコンシステンシーの指標としてのスランプ試験 (JIS A 1101) により管理されているが、本技術は、動画撮影し

たアジテータ車のシュートを流下するコンクリートの勾配の経時的な変化からコンシステンシーを示す指標を抽出し、性状を判定するものである。これにより、施工現場にて受け入れる全てのコンクリートのスランプを自動かつリアルタイムで認識することができる。

図-1 に本システムの適用イメージを示す。機材構成は、画像撮影のための市販のビデオカメラ、警告を発信するパトランプおよび分析システムを搭載したパソコンである。アジテータ車のシュートを撮影する市販のビデオカメラとパトランプを設置し、パソコンに動画像が送信されるとシュートの位置および着目する範囲をAIによって自動認識する。その後、コンクリートがシュートを流れるその状態から、コンクリートの性状を分析し、施工性の悪いコンクリートが検知されると、供給・圧送を中断し、スランプ試験等を再度実施して現場監督が最終判断する。

2.2 動画像分析によるコンクリートの勾配の取得方法

写真-1 に撮影位置を示す。撮影位置は、アジテータ車の斜め後方とした。アジテータ車からコンクリートを荷卸ししている際のシュートを撮影し、撮影した動画は即座にPCにデータが送信され、リアルタイムで性状を

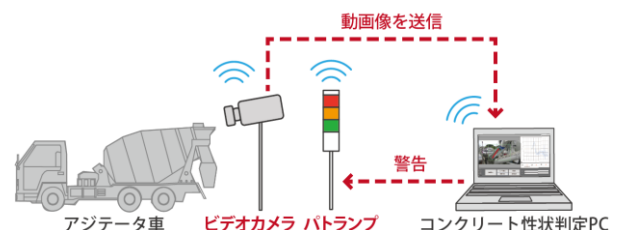


図-1 全量検査システムの適用イメージ

*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 研究員 修士(工学) (正会員)

*2 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 研究員 (正会員)

*3 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 鹿島建設 (株) 土木管理本部 土木技術部 担当部長 修士(工学) (正会員)



写真-1 カメラの設置状況

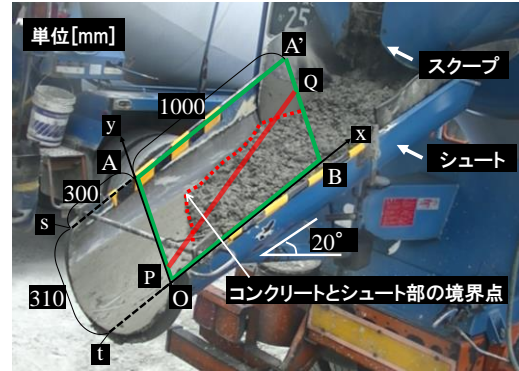


図-2 コンクリートの勾配の取得範囲

判定するための解析が行われる。

図-2 にシュートを流下するコンクリートの勾配の測定範囲を示す。測定範囲はシュート中央部に位置する四角 $OAA'B$ とした。四角 $OAA'B$ は、線分 OA と線分 AA' を持つ平行四辺形であり、本実験においては、線分 OA の長さは、シュート端部の円弧上端の点 s と最下点 t を結んだ線分 st の長さ 310mm とし、線分 AA' の長さはシュートの縁に沿って、点 s より 300mm 上流側の点 A を始点とする点 A' までの長さ $1,000\text{mm}$ とした。また、線分 PQ で示すコンクリートの勾配は、動画像分析により直線 AO を y 軸、直線 OB を x 軸とした座標上に、コンクリートとシュート部の境界となる点をプロットし、それらの点を最小二乗法により近似することで算出した。

3. 検討の手順

はじめに、基礎実験により前述した動画像分析により得られたシュートを流れるコンクリートの勾配から、スランプを推定する方法について検討した。具体的には、スランプの異なるコンクリートを対象として、それぞれのスランプに対して得られたコンクリートの勾配をパラメータとし、スランプとの相関について検討した。

次に、施工実験として実際にコンクリートの打込みを行う現場にて全量検査システムを導入した。施工実験では、基礎実験にて得られたシュートを流れるコンクリートの勾配とスランプの相関の再現性について検証した。その際に、数十台を超えるアジテータ車の搬入においても、シュートの位置を AI が判定できること、シュートの撮影角度が異なる場合においても、測定範囲を認識してコンクリートの勾配を取得できること、取得したデータをリアルタイムで動画像を解析 PC へ送信すること等の本システムの妥当性の確認および課題の抽出を行った。

4. 基礎実験

4.1 実験概要

表-1 および表-2 にそれぞれ実験に供した使用材料

表-1 コンクリートの材料

材料名	記号	備考
水	W	上澄水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 比表面積 $3,340\text{cm}^2/\text{g}$, 密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	S1	山砂, 君津産, 表乾密度 $2.56\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率 2.10
	S2	石灰岩砕砂, 津久見産, 表乾密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$, 粗粒率 3.70
粗骨材	G	石灰岩碎石 2005, 津久見産, 表乾密度 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$, 実積率 61.0%
混和剤	Ad	AE 減水剤 (標準形)

表-2 実験に供したコンクリートの配合

目標 スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m^3)					Ad (C*%)
				W	C	S1	S2	G	
12	54.0	46.3	4.5	169	313	576	246	996	1.00

表-3 スランプ試験の結果

配合	スランプ の水準 (cm)	空気量 (%)	練上がりからの経過時間 (分)
基準コンクリート	12.0	3.7	0
	11.5	3.6	30
	9.5	3.0	90
経時コンクリート	7.5	2.6	110
	23.0	4.2	0
加水コンクリート	18.0	4.3	110

およびコンクリートの配合 (以下、基準コンクリート) を示す。本実験では、スランプの違いがシュートを流れるコンクリートの勾配に及ぼす影響を把握することを目的とし、表-3 に示すようにスランプ 12cm のコンクリートを基準として、 7.5cm から 23cm まで変化させた。経時コンクリートとは、時間の経過によってスランプを 11.5cm , 9.5cm および 7.5cm に変化させたものである。また、加水コンクリートは、基準コンクリートに単位水量 $40\text{kg}/\text{m}^3$ を外割にて加水し、練上がり量が 23.0cm のものと、その後の時間の経過によって 18.0cm まで低下させた

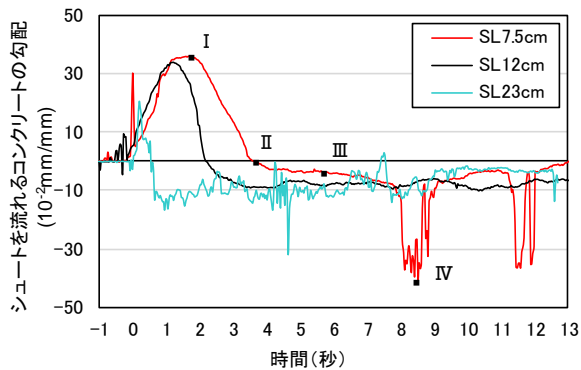


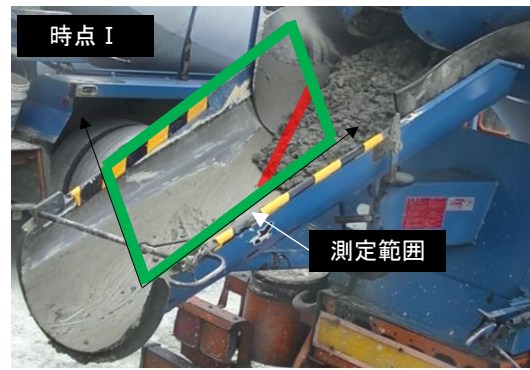
図-3 コンクリートの勾配の経時変化

ものの2水準である。試験において、コンクリートの排出の際のアジテータ車のドラムの回転速度は 4.0rpm 一定とした。また、シュートの角度は、大型のコンクリートポンプ車への荷卸しを想定して 20 度一定とした。

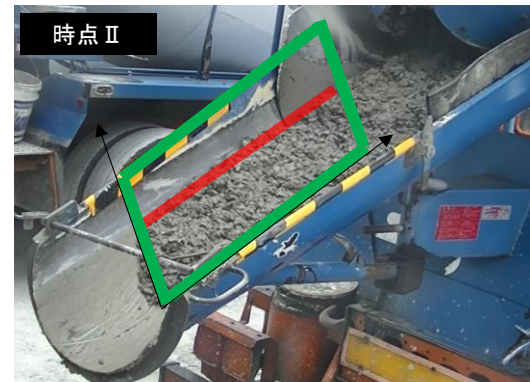
4.2 実験結果および考察

図-3 にシュートを流れるスラブ 7.5cm, 12cm および 23cm のコンクリートの勾配の経時変化の比較を示す。はじめに、スラブ 7.5cm の勾配の変化に着目することとした。図-4 にスラブ 7.5cm における I, II, III, IV 時点でのシュート上のコンクリートの状態を示す。流下するコンクリートの先端が測定範囲に到達し (0 秒), 計測開始から 2 秒程度はコンクリートの勾配が増加して (グラフの点 I まで), その後, 勾配が減少した。そして, 3.5 秒の時点で測定範囲をコンクリートの先端が通り抜け, 勾配がゼロ (グラフの点 II) となった。さらに, コンクリートを排出し続けると, マイナスの勾配 (グラフの点 III 付近) を示した。経過時間 8 秒程度の際に, 勾配の値が $-40 \sim -30 \times 10^{-2} \text{mm/mm}$ と極端に小さくなる箇所 (グラフの点 IV) が認められたが, これは, 一時的にシュートからコンクリートが落下せず, 停止したことにより, 画像分析によってコンクリートとシュート部の境界線が検知されなかったことによるものである。このように勾配が極端に小さくなる箇所が認められた場合, 流動性が低下した施工性の悪いコンクリートとして検知し, 排除できることが確認された。

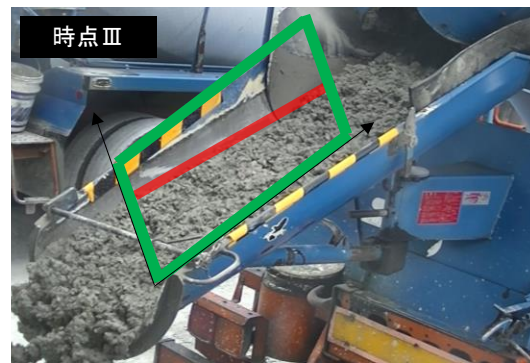
次に, スラブの違いによる勾配の変化に着目した。シュートを流れるコンクリートの勾配の最大値は, スラブ 7.5cm および 12cm で $35 \times 10^{-2} \text{mm/mm}$ 程度であるのに対し, スラブ 23cm では $20 \times 10^{-2} \text{mm/mm}$ 程度まで低下する傾向が認められた。これは, スラブが小さい 12cm 以下のコンクリートの場合, スクープから排出する際にまとまった状態でシュート上に落下し, シュート上においても変形しにくく, 平坦にならずに塊として測定範囲に到達したためと考えられる。シュートを流れるコンクリートの勾配が増加して最大値となり, その後, 減少してゼロになるまでの秒数に着目すると, スラブ



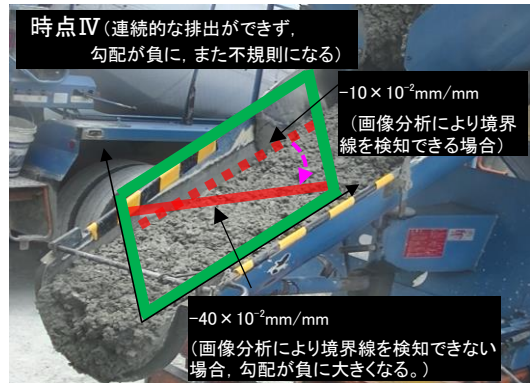
(i) 地点 I における状態



(ii) 地点 II における状態



(iii) 地点 III における状態



(iv) 地点 IV における状態

図-4 流下するコンクリートの外観 (SL=7.5cm)

7.5cm の 3.5 秒に対しスラブ 12cm で 2.0 秒, スラブ 23cm では 0.5 秒となり, スラブが小さいものほど勾配がゼロになるまでの時間が長くなる傾向を示した。これについても, 前述のシュートを流れるコンクリートの勾

配の最大値が異なる理由と同様で、スランプが小さいコンクリートはシュート上で変形しにくいいため、勾配がゼロになるまでの時間が長くなったものと考えられた。

以上の結果より、シュートを通るコンクリートの勾配の最大値と勾配がゼロになるまでの時間に着目することで、スランプが推定できるものと考え、以下にスランプとの関係について検討した。

(1) シュートを通るコンクリートの勾配の最大値とスランプとの関係について

図-5 にシュートを通るコンクリートの勾配の最大値とスランプの関係を示す。勾配の最大値とスランプでは勾配の最大値が大きくなるほど、スランプが小さくなり、相関係数で 0.882 と高い相関が認められた。この結果により、シュートを通るコンクリートの勾配の最大値からスランプを推定できる可能性が示唆された。

(2) 勾配がゼロになるまでの時間とスランプとの関係について

図-6 に勾配がゼロになるまでの時間とスランプの関係を示す。勾配がゼロになるまでの時間についても、シュートを通るコンクリートの勾配の最大値と同様に、勾配がゼロになるまでの時間が長くなるに従って、スランプは小さくなり、相関係数で 0.970 と高い相関が認められた。この結果により、勾配がゼロになるまでの時間についてもスランプを推定できる可能性が示唆された。

(3) シュートを通るコンクリートの勾配の積分値とスランプとの関係について

上記、(1)および(2)においてシュートを通るコンクリートの勾配の最大値、勾配がゼロになるまでの時間とスランプには高い相関が認められたが、基礎実験ではコンクリートの排出の際、アジテータ車のドラムの回転速度を 4.0rpm 一定として実験を行ったために、それぞれの値においてスランプと高い相関が得られたものと考えられた。実施工では、ポンプ車の打込み速度によってアジテータ車からの排出量を変える必要があり、アジテータ車のドラムの回転速度が一定とならないことから、シュートを通るコンクリートの勾配の最大値および勾配がゼロになるまでの時間とスランプとの相関が小さくなる可能性が考えられた。そこで、図-7 で示すように、シュートを通るコンクリートの勾配がゼロになるまでの時間で積分した値を新たな指標として、スランプとの相関を検討した。図-8 にシュートを通るコンクリートの勾配の積分値とスランプの関係を示す。シュートを通るコンクリートの勾配の積分値を指標とした場合においても相関係数で 0.959 となり、高い相関が得られた。

以上の結果を踏まえ、前述の 3 つの指標について、実際にコンクリートポンプ車へ排出するアジテータ車を用いた施工実験で検討することとした。

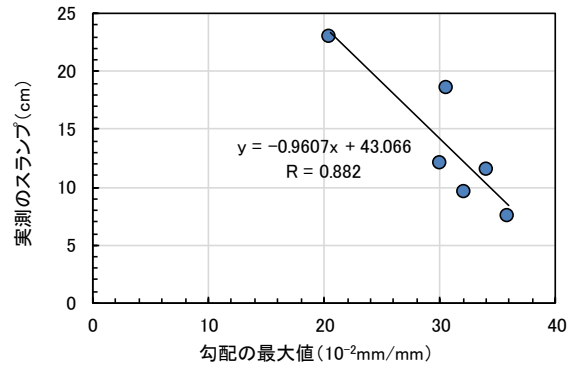


図-5 シュートを通るコンクリートの勾配の最大値とスランプの関係

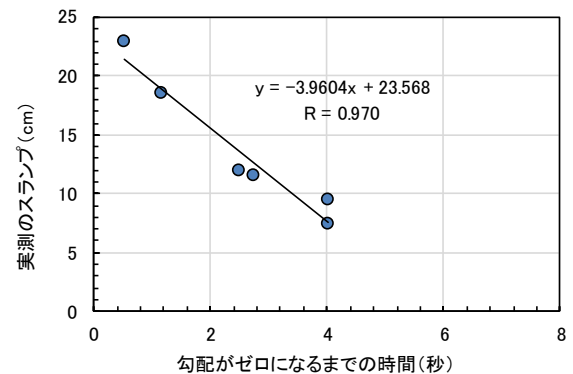


図-6 勾配がゼロになるまでの時間とスランプの関係

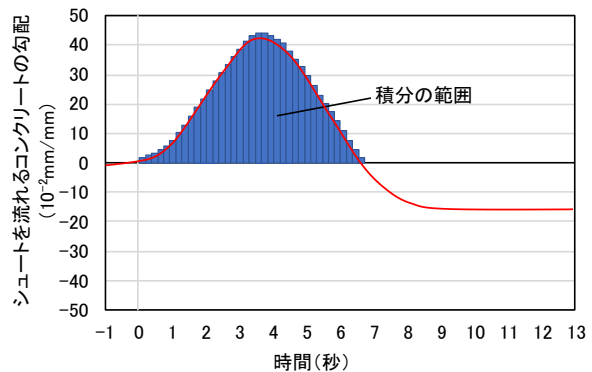


図-7 シュートを通るコンクリートの勾配の積分値

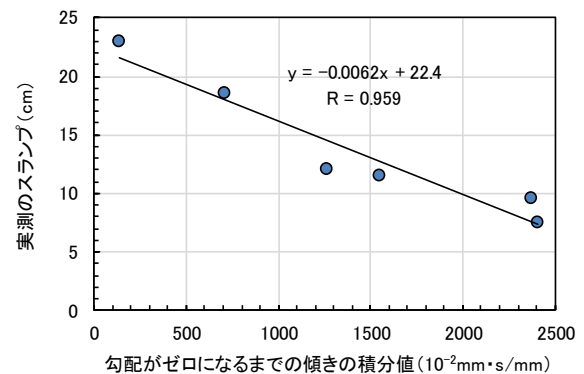


図-8 シュートを通るコンクリートの勾配の積分値とスランプの関係

5. 施工実験による検証

5.1 実験概要

施工実験は、ボックスカルバートの中壁を模擬した構造物で、幅(w)1.5m、高さ(h)6.0mのうち3.0m/リフト×2リフトとし、1BLの延長(L)9.0mを対象としたものである。上記、中壁の施工のうち、全量検査システムを2回の打込みの際に適用し、1回目を22台分、2回目を10台分の計32台分を実験に供した。

表-4 および表-5 に、施工実験に供した使用材料およびコンクリートの配合を示す。目標スランプは 12cm とし、また、セメントは高炉セメント B 種、粗骨材は硬質砂岩砕石を用いた。さらに、施工中に、細骨材の表面水率によって単位水量を+12kg/m³ 程度増加させることでスランプ 18cm のコンクリートを製造し、実験の対象とした。コンクリートの打込み速度は 28m³/hour で実施したが、その際に、コンクリートの排出速度はアジテータ車の操縦者には指示せずに、コンクリートの打込み状況に合わせてコンクリートポンプ車のホップに投入することとした。また、アジテータ車のシュートの角度は、コンクリートポンプ車のホップに据え付けられた際に、基礎実験と同様の 20 度であった。動画撮影用のカメラについても、基礎実験と同様にアジテータ車のシュートが撮影可能なコンクリートポンプ車のホップの横に設置した。

5.2 実験結果および考察

施工実験の際には、アジテータ車 32 台を対象として、スランプを測定した。図-9 に測定したスランプの全データを示す。スランプは 9.0~19.5cm の範囲で、平均で 15.0cm であった。

全量検査システムの稼働状況については、アジテータ車 32 台全てに対してシュートの位置を AI によって自動認識し、測定範囲を定め勾配を自動的に取得することができた。また、測定した動画をリアルタイムに PC へ送信し、解析を行うことができた。以上の結果より、施工実験において、本システムが機器等のトラブルなく稼働することが確認された。

図-10 に施工実験におけるシュートを流れるコンクリートの勾配の最大値とスランプの関係を示す。図中には、3. 基礎実験の結果も併せて示す。施工実験におけるシュートを流れるコンクリートの勾配の最大値とスランプ相関係数が 0.602 となり、基礎実験で得られた相関係数 0.882 と比較して低い結果となった。この理由として、コンクリートの打込み状況に合わせてコンクリートポンプ車のホップに荷卸したため、基礎実験とは異なりアジテータ車からのコンクリートの排出量が一定にならなかったことが考えられる。

図-11 に流動勾配がゼロになるまでの時間とスラン

表-4 施工実験に供したコンクリートの材料

材料名	記号	備考
水	W	地下水
セメント	C	高炉セメント B 種,比表面積 3,750cm ² /g,密度 3.04 g/cm ³
細骨材	S1	砕砂,八王子産,表乾密度 2.63 g/cm ³ ,粗粒率 3.10
	S2	山砂,君津産,表乾密度 2.59 g/cm ³ ,粗粒率 1.70
粗骨材	G	砕石 2005,八王子産,表乾密度 2.65g/cm ³ ,実積率 59.0%
混和剤	Ad	AE 減水剤 (標準形)

表-5 施工実験に供したコンクリートの配合

目標スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)					Ad (C*%)
				W	C	S1	S2	G	
12.0	52.2	46.9	4.5	168	322	541	293	960	1.00

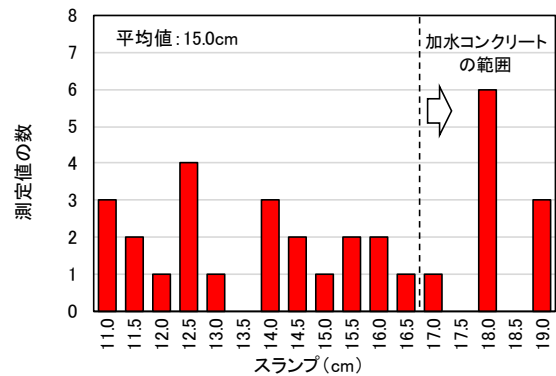


図-9 測定したスランプの全データ

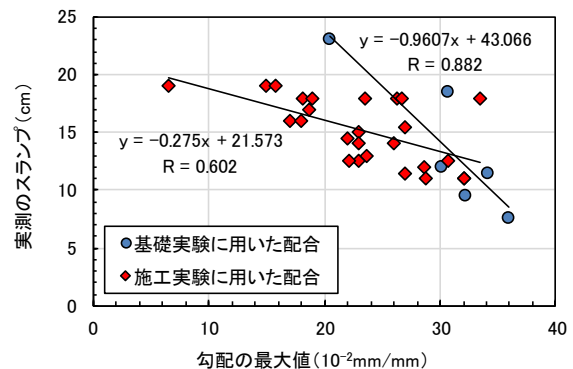


図-10 シュートを流れるコンクリートの勾配の最大値とスランプの関係

プの関係を示す。流動勾配がゼロになるまでの時間とスランプの相関係数が 0.088 となり、シュートを流れるコンクリートの勾配の最大値の結果と同様に、基礎実験で得られた相関係数 0.970 と比較して低い結果であった。この理由についても、シュートを流れるコンクリートの

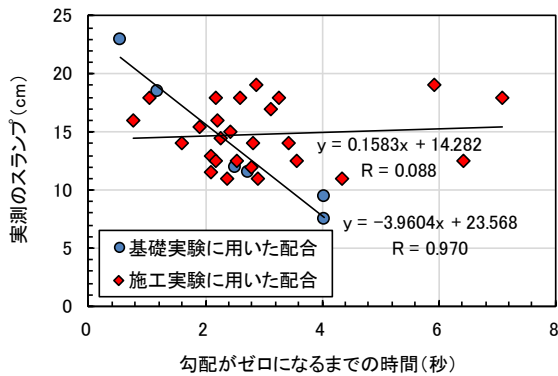


図-11 勾配がゼロになるまでの時間とスランプの関係

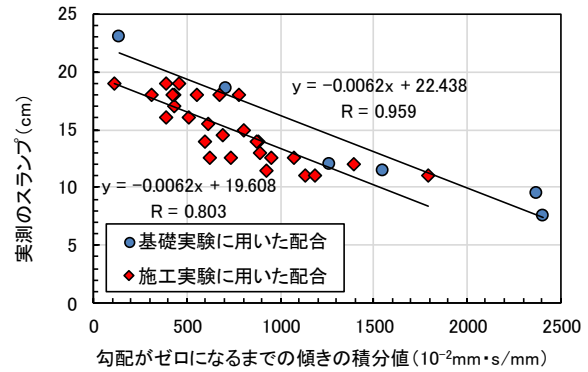


図-12 シュートを流れるコンクリートの勾配の積分値とスランプの関係

勾配の最大値とスランプの結果と同様、コンクリートの打込み状況に合わせてコンクリートポンプ車のホッパに荷卸したためと考えられる。アジテータ車の操縦者は、シュート上を流動するコンクリートの性状を目視で確認し、ホッパへの供給がある程度一定となるように、排出速度を調整したため 2.0 秒から 4.0 秒の範囲でデータが集中する結果が得られたものと推察される。

以上の2つの結果より、施工実験では、シュートを流れるコンクリートの勾配の最大値および勾配がゼロになるまでの時間のそれぞれの指標において、スランプとの相関が小さく、スランプを推定する手法としては適さないことが確認された。

図-12 にシュートを流れるコンクリートの勾配の積分値とスランプの関係を示す。シュートを流れるコンクリートの勾配の積分値とスランプの相関係数が 0.803 となり、高い相関が得られ、スランプを推定できることが確認された。ここで、同一のスランプにおいても勾配の積分値が異なる結果が得られているが、その理由として、動画撮影中にカメラ、シュートがアジテータ車の移動時の振動等により測定範囲がぶれることや、固定して設置されたカメラに対し、シュートを据え付ける方向が台数ごとに若干異なるため流下するコンクリートの勾配の見え方が異なることが挙げられる。カメラが振動によってぶれないような固定方法の工夫や、シュートを据える方向を一定とすることで、測定値のばらつきは低減できるものと考えられる。

基礎実験と施工実験によって近似曲線が同一の式とならないことについては、スランプが同一であってもコンクリートの材料や配合によってコンシステンシーが異なるため、シュートを流下する際の勾配の経時的な変化の挙動が異なったものと考えられる。そこで、現状では、コンクリートの配合ごとに勾配の積分値のデータを取得して、キャリブレーションを行う必要がある。今後、データを蓄積することで判定精度を向上させ、材料やコンクリートの配合によらず、スランプの推定を普遍的なも

のとするために改良していく所存である。

6. まとめ

コンクリートの全量受入れ検査により初期欠陥の発生リスクが高いコンクリートを排除することを目的として、動画分析を活用したコンクリートの性状判定手法を考案し、下記の結果を得た。今後は、材料や配合の異なるコンクリートでの検討、シュートの方向等を水準とした同様のデータを蓄積し、判定精度を高める予定である。

- (1) 動画分析により取得したシュートを流れるコンクリートの勾配の最大値、流動勾配がゼロになるまでの時間とスランプの関係は、アジテータ車から排出されるコンクリートの排出量が一定にならない条件では相関が低い結果であった。
- (2) シュートを流れるコンクリートの勾配の積分値の指標を用いることで、実施工においても荷卸しの速度によらず、スランプを推定することができた。これによって、受け入れるコンクリートの「全量の性状・品質の連続かつリアルタイム管理」、「管理・検査の省人・省力化」の実現を可能とした。

謝辞：本研究に際しまして、(株)カイにシステムの開発から画像解析に至るまでご協力を頂きました。この紙面をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕, pp.197-200, 2017
- 2) 堂山修治, 竹下正一, 堤英彰, 城澤道正:i-Construction (建設現場の生産性革命)の推進と建設現場の安全性の向上に向けて, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol.73, No.2, I_1-I_6, 2017
- 3) 倉田和英, 松本修治, 柳井修司, 坂井吾郎, 橋本学, 平陽兵, 片村立太:動画分析を活用したフレッシュコンクリートの性状判定手法の検討, 土木学会第74回年次学術講演会講演概要集, V-567, 2019