

各種センサを用いたフレッシュコンクリートの全量管理システムの開発

堀 田 和 宏 神 代 泰 道 都 築 正 則

並 木 憲 司 山 本 直 輝
(東京本店) (東京本店)

Development of Quality Control System for Fresh Concrete Using Sensors

Kazuhiro Hotta Yasumichi Koshiro Masanori Tsuzuki

Kenji Namiki Naoki Yamamoto

Abstract

In concrete construction, managing the fluidity of concrete is essential for preventing initial defects. However, increasing the number of concrete tests increases the workload of testers and complicates sample processing. To address this issue, we developed a comprehensive management system that monitors the slump/slump flow of concrete in real time using a load sensor. Verification tests demonstrated a correlation between the concrete slump/slump flow and flow load, indicating that flowability can be effectively managed using data on the concrete flow velocity and load. When applied to actual construction, this system allowed for the proper management of slump flow while minimizing the testing frequency. In the future, we aim to further improve productivity by accumulating data and improving the system's usability.

概 要

コンクリート工事において、豆板やコールドジョイント等の初期欠陥や圧送中の閉塞等を防止するためには、コンクリートの流動性の管理が重要である。しかし、コンクリートの試験回数を増やすと、試験員の配置に加え、作業および使用した試料処理の手間が増加する。そこで、コンクリートの流動性を、スランプ・スランプフローに代えて、荷重センサによる荷重値としてリアルタイムに管理できる全量管理システムを開発した。本システムによって、コンクリートの流動性の推定手法を実験的に検証した結果、スランプ・スランプフローは荷重値と相関があり、コンクリートの速度と荷重値の情報を基に流動性を推定できる見通しが得られた。本システムを実工事に適用した結果、コンクリートの試験回数を増やすことなく、打ち込んだ全量のコンクリートのスランプフローを適切に管理できた。今後はデータの蓄積やシステムの利便性向上を図り、更なる生産性向上を目指す。

1. はじめに

コンクリート工事において、豆板やコールドジョイント等の初期欠陥や、圧送中の閉塞等を防止するためには、コンクリートの流動性（スランプ・スランプフロー）の管理が重要である。また、CFT造における圧入工事では、鋼管柱の充填性確保および柱内部に作用する圧力による鋼管柱の降伏防止の観点から、打込み速度についても一定値以下となるよう配慮する必要がある¹⁾。大林組では、鋼管柱の圧入圧力に関してはCFTproΣ^{®2)}によって連続的に管理している。一方で、スランプ・スランプフローを連続的に管理するためには試験の回数を増やす必要があるが、試験員の配置に加え、作業および使用した試料処理の手間が増加するため限界があり、全量管理は大きな課題であった。

近年ではトラックアジテータの内部に荷重計を設置し、コンクリートの流動性を管理する方法³⁾や、シュートを流れ落ちるコンクリートの動画を基にAIを用いた画像解析でスランプを推定する方法⁴⁾が提案されている。しかし、前者については車体の改造が必要となり、特定

の車に限定される。後者については、多くの画像データの蓄積による判定精度の向上が課題である。そこで、筆者らは、荷重計や加速度計といった汎用的なセンサを組み合せ、既存の機器に対して容易に着脱可能な構成とすることで、フレッシュコンクリートの流動性をリアルタイムに全量管理できるシステムを開発した。

本報では、本システムの開発概要と、本システムを使用したフレッシュコンクリートの流動性の確認実験の結果および考察に加え、本システムを現場に適用し、有効性を検証した結果を示す。

2. システムの開発概要

2.1 計測機器の概要

システムの計測機器の概要を Fig. 1 に、設置例を Photo 1 に示す。本システムは、筒体に内蔵された荷重計、熱電対、加速度計、無線データロガーおよび計測用 PC によって構成されている。測定時は、荷重計および熱電対を含む測定部をトラックアジテータのシュート部等の傾斜部に設置する(Photo 1)。この状態でコンクリートを排

出することで、コンクリートの性状に応じた荷重が取得できる。例えば、コンクリートのスランプ・スランプフローが低下した場合、コンクリートが荷重計を回り込むために必要な変形の応力（降伏値）が大きくなり、荷重も大きくなる。そのため、この値を基にスランプ・スランプフローの変化が評価可能と考えられる。なお、荷重の値は、シュートを流れるコンクリートの速度変化に起因する運動エネルギーの変動の影響を受けることが推察される。これを受け、本システムでは荷重計を2台（上流側・下流側）間隔を設けて搭載する形とし、2点の計測波形の位相差を基にした速度解析や、荷重の差分等を用いた流動性評価を行える形とした。

加速度計は、Photo 1 に示したように、コンクリートポンプのホッパー付近に設置する。これによりコンクリート送出時のピストンの動き（脈動）を加速度のピークとして捉えることができるため、打込み量および打込み速度の把握が可能となる。

全てのセンサは無線データロガーに接続されており、近距離無線通信によって計測データを計測用 PC に送信可能であるため、配線の制約を受けることなく使用できる。

2.2 モニタリング方法の概要

計測用 PC における、計測システムのモニタリング画面の一例を Fig. 2 に示す。本システムでは、計測データの経時変化をリアルタイムで表示することができ、後述する任意のフィルタを適用した状態でモニタリングすることもできる。

フィルタは主にローパスフィルタとスムージングフィルタを採用している。ローパスフィルタ（Fig.2：上から5段目）は特定の周波数以下の信号を通過させ、それ以上の周波数の信号を減衰させることで車体の振動等に起因するノイズの除去を行うことができるため、波形の特徴（周期等）を把握する際に有効である。スムージングフィルタ（Fig.2：上から6段目）は任意の計測間隔で移動平均を取得でき、振幅が激しい波に対して簡易に平均値を得ることができるため、荷重のモニタリングに有効である。

3. 流動性の確認実験

3.1 実験概要

3.1.1 スランプ・スランプフローと荷重の関係 開発したシステムによって得られるコンクリートの荷重値と、実際のスランプ・スランプフローの関係性を検証するため、コンクリートの流動性の確認実験を実施した。実験のイメージを Fig. 3 に示す。図のようにトラックアジテータとコンクリートポンプを配置し、コンクリートを循環させ、本システムによる計測を行いながら、時間経過と共に低下するスランプ・スランプフローを確認することで、荷重値とスランプ・スランプフローの関係を

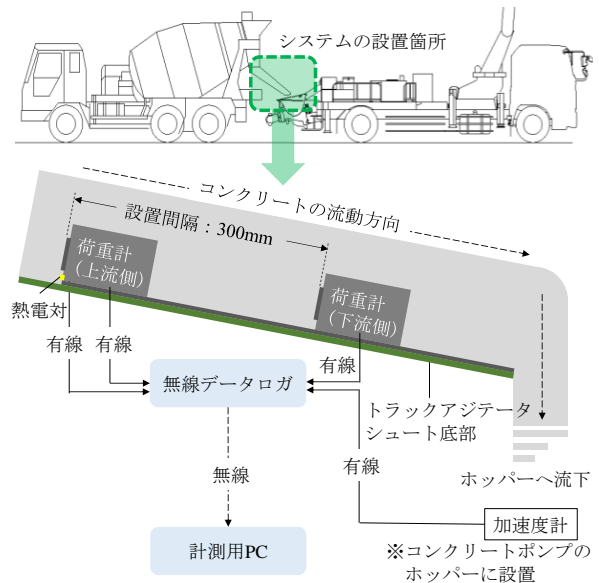
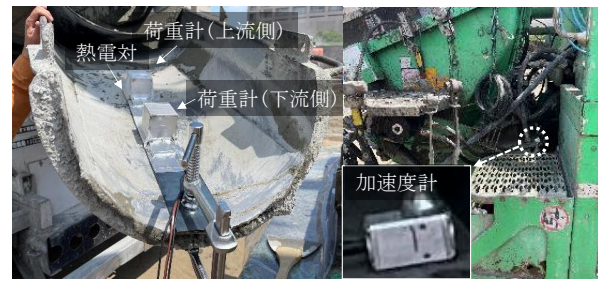


Fig. 1 システムの概要
System Overview



(a)トラックアジテータ シュート部分 (b)コンクリートポンプ ホッパー部分

Photo 1 システムの設置例
System Installation Examples

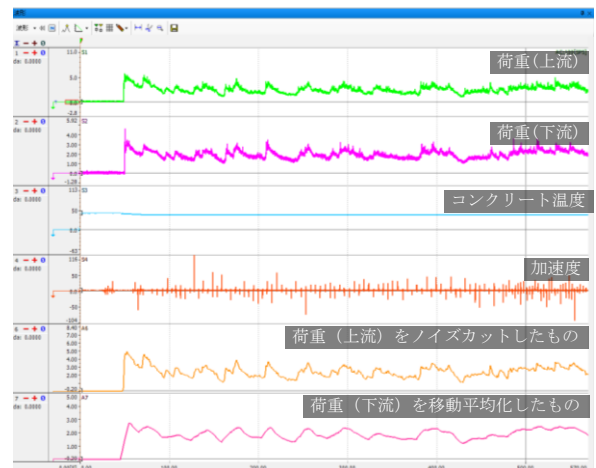


Fig. 2 計測システムのモニタリング画面
Example of System Monitor

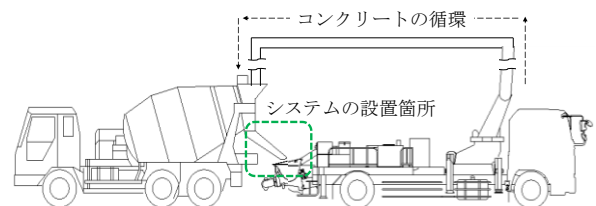


Fig. 3 流動性の確認実験のイメージ
Image of Experiment

得る計画とした。なお、コンクリートの循環においては、コンクリートポンプの設定吐出速度を 30, 50, 90 m³/h に変化させ、ホッパー内のコンクリートが常に一定量となるようにトラックアジテータのコンクリート排出量も変化させることで、コンクリートの吐出速度に起因する荷重の変化も取得した。

3.1.2 コンクリートの粘性評価に関する検討 コンクリートの流動性という観点からは粘性の把握も重要である。コンクリートのような粘性を有する流体の物理的な性質（レオロジー特性）は、通常、ビンガムモデル（作用する力が一定以上になるまで流動しないモデル）として考慮されることが多い⁵⁾。ビンガムモデルを構成する物理定数（レオロジー定数）は「降伏値」と「塑性粘度」とされており、流体に作用する力（せん断応力）と流速（せん断ひずみ速度）の関係を得ることで求められる。レオロジー定数を得るには回転粘度計^{例えば 6)}等の特殊な装置が必要であるが、本実験においてはみかけのせん断応力として荷重が、みかけの流速として吐出速度が得られるため、これらの値を基にみかけのレオロジー定数を求め、スランプフローとの関係についても検討を行った。

3.2 実験で使用したコンクリート

使用したコンクリートの調合を Table 1 に示す。コンクリートは CFT 圧入工事を想定し、呼び強度 50, スランプフロー 60cm(50-60-20N)とした。

3.3 実験状況と計測項目

実験状況を Photo 2 に、計測項目を Table 2 に示す。2.1 節で述べたように、2 点の荷重計によってコンクリートの荷重を、加速度計によってコンクリートポンプのシリンダの脈動を取得する計画とした。なお、実験の時期は、コンクリートのスランプ・スランプフローが低下しやすい夏期とした。また、コンクリートは 4.5m³ 積みのトラックアジテータに 3m³ 積載する計画とし、コンクリートポンプはピストン式の 7 t 車（理論最大吐出量：100 m³/h, シリンダ容量：44 L）を選定した。

4. 実験結果と考察

4.1 スランプ・スランプフローと荷重の関係

スランプ・スランプフローと上流側の荷重（計測波形の 90 秒平均値）の関係をコンクリートポンプの吐出速度ごとに整理した結果を Fig. 4 に示す。吐出速度が 90m³/h でスランプフローが 50cm 程度におけるデータが不足しているものの、図より、スランプ・スランプフローと荷重には相関があり、一次関数で概ね近似が可能と考えられる。また、吐出速度が大きくなるほど、この関係は荷重が大きい方向にスライドする傾向が確認された。したがって、荷重および吐出速度（もしくは、これと相関のある速度情報）を得ることで、コンクリートのスランプ・スランプフローを推定可能と考えられる。なお、

Table 1 コンクリートの調合(50-60-20N)

Mix Proportion of Concrete						
W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				化学混和剤 (C×%)
		W(水)	C(セメント)	S(細骨材)	G(粗骨材)	
39.5	50.3	170	431	885	894	1.3



Photo 2 実験状況
Experimental Situation

Table 2 計測項目
Measurement Items

項目	計測の目的
荷重 (上流)	・コンクリートのスランプ・スランプフローを推定するための荷重を取得する
荷重 (下流)	
加速度	・コンクリートポンプの脈動をカウントする

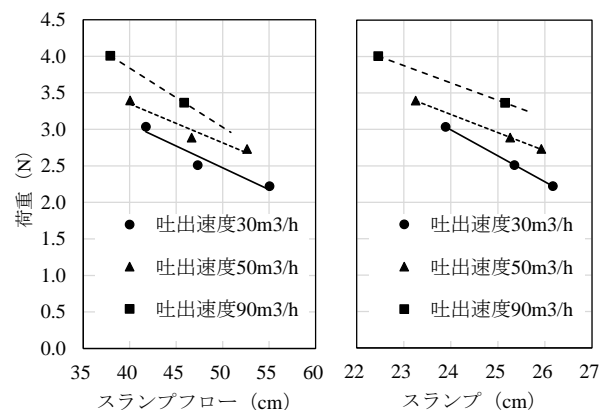


Fig. 4 スランプ・スランプフローと荷重の関係
Relationship between Slump/Slump-flow, and Load

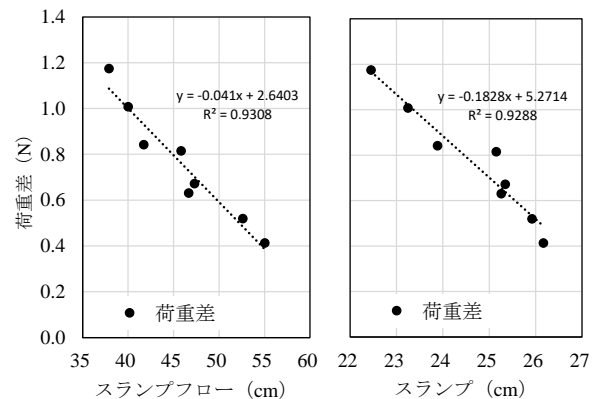


Fig. 5 スランプ・スランプフローと荷重差の関係
Relationship between Slump/Slump-flow, and Load difference

下流側の荷重も上流側と概ね同様の傾向が見られたが、上流側の荷重計にコンクリートの流れが乱された状態で計測されたため、0.7～0.8 倍に低減された値となった。

スランプ・スランプフローと、荷重差（上流側の平均荷重から下流側の平均荷重を差し引いたもの）の関係を Fig. 5 に示す。コンクリートのスランプ・スランプフローが大きいほど、荷重差は小さくなる傾向が得られた。これは、コンクリートの流動性が高いほど、上流側の荷重計から下流側の荷重計に滑らかに回り込んで到達するためと考えられる。また、図より、コンクリートの吐出速度に関わらずこれらは直線的な関係を示した。したがって、コンクリートの荷重差を利用することで、速度の影響を軽減でき、コンクリートのスランプ・スランプフローを精度よく推定できる可能性が示唆された。

4.2 荷重の波形

荷重の計測波形の一例を Fig. 6 に示す。荷重は、上流側、下流側ともに一定の周期性が見られた。これは、トラックアジテータのドラムの回転が影響したものと考えられる。ここで、上流側、下流側の計測波形を比較すると、上流側の波形と類似した形状の波が、下流側で数秒遅れて計測されていることが分かる。これは、荷重センサの設置間隔に起因した位相の差によるものと思われる。したがって、双方の波の位相差を得ることができれば、シュートを流れるコンクリートの速度を得ることができ、コンクリートの打込み速度やスランプ・スランプフローの推定精度向上に寄与すると考えられる。しかし、計測波形にはノイズが多く含まれているため、無処理の状態では位相差を得ることが難しい。そこで、計測波形にローパスフィルタ(0.35 Hz)を適用し、元の波形と比較したものを Fig. 7 に示す。図より、波形の特徴点（極値）を比較することで位相差を取得しやすくなり、この値を用いることで流動性の推定精度を向上できる可能性が示唆された。

4.3 加速度の波形

コンクリートポンプの吐出速度を 30 m³/h にしたときの加速度の計測波形の一例を Fig. 8 に示す。図より、コンクリートポンプの脈動と思われるピークが確認できる。図では 90 秒の計測中に 17 回のピークが見られるため、1 時間あたりの脈動は 680 回と計算でき、ここにシリンダ容量である 44 L を乗じることで吐出速度は 29.9 m³/h と推定可能である⁷⁾。これは前述したコンクリートポンプの吐出速度の設定値とほぼ同値であるため、加速度センサの設置によって吐出速度をモニタリングできることが示唆された。

4.4 コンクリートのレオロジー特性の考察

上流側の荷重（計測波形の 90 秒平均値）と吐出速度の関係を Fig. 9 に示す。フレッシュコンクリートの流動性がビンガムモデルで近似できる場合には、せん断応力と

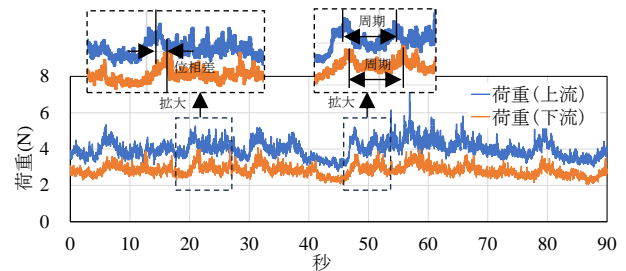
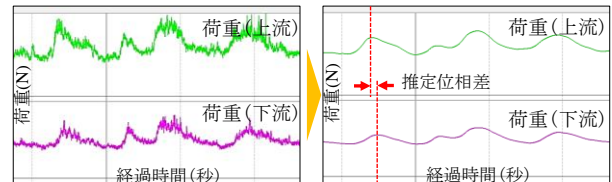


Fig. 6 荷重の計測波形の一例
Example of Load Waveform



(a) 無処理 (b) ローパスフィルタ適用
Fig. 7 波形解析による位相差推定
Phase Difference Estimation by Waveform Analysis

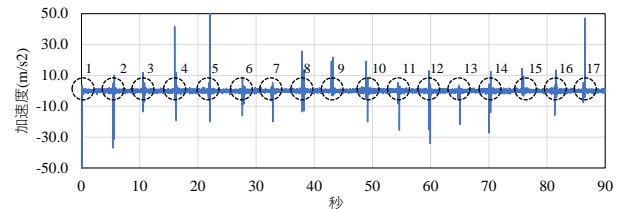


Fig. 8 加速度の計測波形の一例
Example of Acceleration Waveform

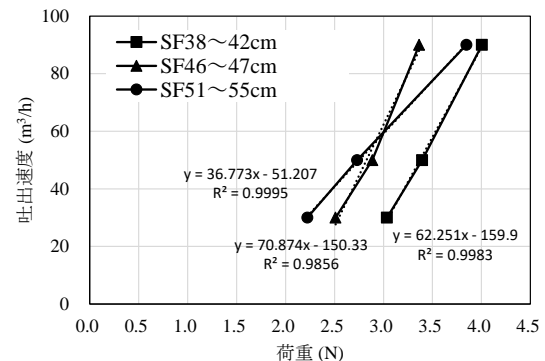


Fig. 9 荷重と吐出速度の関係
Relationship between Load and Discharge Speed

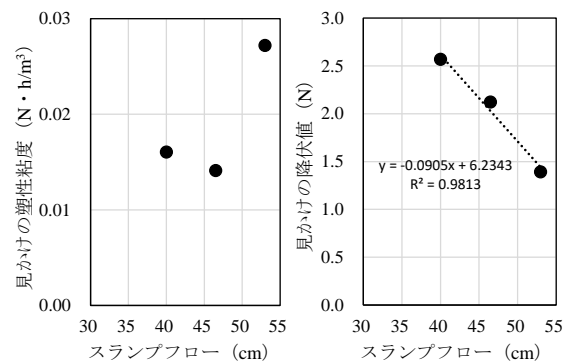


Fig. 10 スランプフローとみかけのレオロジー定数の関係
Relationship between Slump-Flow and Apparent Rheological Constants

ひずみ速度の関係は線形となり、原点を通らないとされている⁵⁾。本実験結果においても、荷重と吐出速度の線形傾向が、吐出速度が $0\text{ m}^3/\text{h}$ に近い状況でも維持されると仮定すると、同様の傾向が得られていると考えられる。

Fig.9を基に、みかけの塑性粘度(直線の傾きの逆数)と、みかけの降伏値(直線のX軸の切片)を求め、スランプフローとの関係を求めたものを Fig. 10 に示す。一般に、コンクリートの粘性が高くなる程、塑性粘度と降伏値は大きくなると言われている。本実験においては、みかけの塑性粘度は、スランプフロー40～46cmの範囲では顕著な差は見られなかったものの、スランプフロー53cmと比較すると小さくなる傾向が見られた。一般に、塑性粘度は 50cm フロー到達時間に対し相関があるとされているため⁸⁾、これらの関係の考察は今後の課題とする。みかけの降伏値は、スランプフローが小さくなる程、直線的に大きくなる傾向が見られた。以上より、本システムによってコンクリートのレオロジー特性についても既往の研究に準じた評価がある程度可能と推察され、スランプ・スランプフローに加えて粘性の評価も加味した品質管理が可能となる見通しが得られた。これらの理論の検証については今後の課題とする。

5. 実施工への適用

5.1 適用の概要

本システムを、関東圏のスタジオ施設(CFT造)に適用した。本建築物のCFT柱の施工方法は落とし込み充填工法であるものの、コンクリートの流動性が低くなるとコンクリートバケットや鋼管柱が閉塞する可能性があるため、本システムを用いて流動性を管理する計画とした。

本工事で使用したコンクリートの調合を Table 3 に示す。呼び強度 58, スランプフロー60cm(58-60-20N)であり、スランプフローが 50cm 未満とならないように管理することが求められた。

5.2 システムの適用方針

本工事はコンクリートポンプを用いない落とし込み充填工法であるため、計測項目は荷重と温度のみとした。流動性の管理は、次に示す手順とした。

まず、システムのキャリブレーション(コンクリートのスランプフローと荷重の関係を得る作業)のため、1台目のトラックアジテータの受入れ試験を行い、スランプフローを得るとともに、シュートに本システムを設置の上、コンクリートを一定速度で排出し、この時の荷重の平均値を取得する。

次に、4章で示した流動性の確認実験によって得られた Fig. 4 の直線(排出速度: $50\text{ m}^3/\text{h}$)の傾きを、同程度の水セメント比, s/a である本調合にも適用できると考え、荷重とスランプフローの関係式(スランプフロー推定関数)を作成するとともに、管理下限値のスランプフロー(ここでは 50cm)に該当する閾値荷重を求める。

Table 3 コンクリートの調合 (58-60-20N)

Mix Proportion of Concrete						
W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				化学混和剤 (C×%)
		W(水)	C(セメント)	S(細骨材)	G(粗骨材)	
35.7	50.1	170	477	852	876	1.6



Photo 3 システムの適用状況
System Application Situation

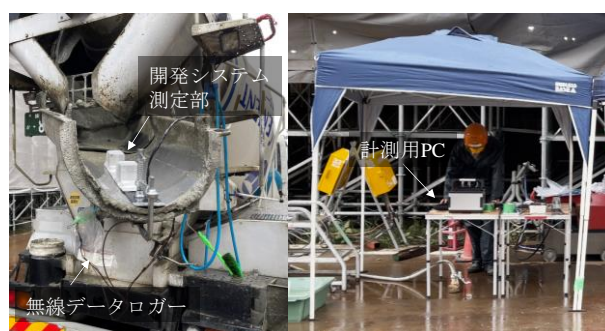


Photo 4 システムの設置・計測状況
System Installation and Measurement Situation

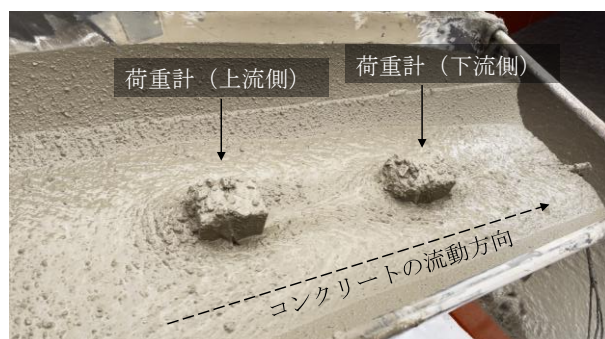


Photo 5 測定部の計測状況
Measurement Situation of the Measurement Unit

そして、2台目以降のトラックアジテータのコンクリートについては、一定速度(約 $50\text{ m}^3/\text{h}$)の排出状況下において、スミングフィルタ(10秒間の移動平均)を適用した荷重が、この閾値荷重を越えないことを確認することで流動性を管理する計画とした。なお、今回は結果検証のため、2～6台目のトラックアジテータに対し、受入れ試験とは別にフレッシュ試験を実施した。

5.3 システムの適用状況

本システムの適用状況を Photo 3 に、システムの設置・計測状況を Photo 4 に示す。また、測定部の計測状況を Photo 5 に示す。本システムにおける無線データロガーと計測用 PC の通信状況は良好であり、データの送信遅延や欠損等は見られなかった。

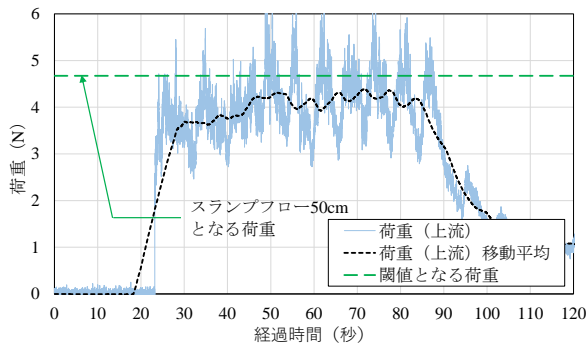


Fig. 11 荷重のモニタリンググラフの一例
Example of Load Monitoring Graph

5.4 システムの適用結果と効果

荷重のモニタリンググラフの一例を Fig. 11 に示す。図はトラックアジテータ 1 台がコンクリートを排出開始し、終了するまでの一連の荷重をモニタリングしたものである。5.2 節で述べたキャリブレーションの結果、スランブフロー 50cm に該当する荷重閾値は 4.7 N であったため、スムージングフィルタを適用した荷重の移動平均(黒点線)がこれを超えないことを確認した。

モニタリングの結果、いずれのトラックアジテータに積載されたコンクリートも閾値荷重を超えたものではなく、良好な性状のものを鋼管柱内部に充填できた。

本工事に使用したコンクリートの上流側の荷重(中速排出中の平均値)と、フレッシュ試験によるスランブフローの関係を、キャリブレーション時に作成したスランブフロー推定関数と比較したものを Fig. 12 に示す。本工事では、コンクリートの排出速度の厳密なコントロールや、トラックアジテータの車種の固定までは実施しなかったため、多少のばらつきが見られたものの、荷重とスランブフローの関係はキャリブレーション時に作成したスランブフロー推定関数に概ね適合し、スランブフローの推定誤差の標準偏差は 4.7cm となった。これはスランブフロー 60cm の許容差である 10cm と比較すると比較的高い精度で推定できたと考えられるが、今後は更なる信頼性向上を検討する。

以上より、本システムの適用によりフレッシュ試験回数を増やすことなく、打ち込んだ全量のコンクリートを管理でき、建築物の品質向上と不具合防止に寄与できた。

6. まとめ

本報では、荷重計等の汎用的なセンサを用いたフレッシュコンクリートの全量管理システムを開発し、実験的検討によってスランブ・スランブフローの推定手法の基礎を構築するとともに、実施工への適用を行った。得られた知見を次に示す。

- 1) シュートを流動しているコンクリートの荷重と速度情報を得ることで、スランブ・スランブフローを推定可能と考えられる。

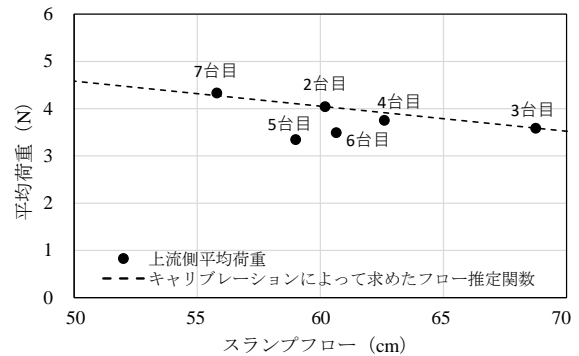


Fig. 12 スランブフロー推定関数と計測結果の比較
Comparison of Slump-flow Estimation Function and Measurement Results

- 2) シュートを流れるコンクリートの速度は、2 点の荷重計によって得られる波形の位相差から推定可能と考えられる。
- 3) コンクリートポンプに設置した加速度計によるピーク数をカウントすることで、打込み速度や打込み数量を推定可能と考えられる。
- 4) 本システムによって得られるみかけの塑性粘度および降伏値により、粘性の評価が可能と考えられる。
- 5) 本システムを実工事に適用した結果、コンクリートのスランブフローを比較的精度よく管理でき、フレッシュ試験回数を増やすことなく、建物の品質向上、不具合防止に寄与できたと考えられる。

今後は、更なるデータの蓄積を行い、スランブ・スランブフローの推定精度を向上させるとともに、キャリブレーションの合理化を進める。また、打込み速度や打込み数量等もリアルタイムに表示できるユーザーインターフェースの構築を進め、コンクリート工事の生産性向上と品質確保の両立を目指す。

参考文献

- 1) 新都市ハウジング協会：コンクリート充填鋼管(CFT)造技術基準・同解説，2024
- 2) 神代泰道，金子智弥：CFT 圧入管理システム「CFTproΣ®」，大林組技術研究所報，No.78，2024
- 3) 廣藤義和：プローブを活用したコンクリート品質の連続管理システムによる生産性向上，コンクリート工学，Vol 55，No 9，pp.783-787，2017
- 4) 倉田和英ほか：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の検討，土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会 V，pp.567-568，2019
- 5) 日本コンクリート工学会：フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書，pp.3-4，1998
- 6) 日本コンクリート工学会：フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書，pp.6-8，1998
- 7) 日本建築学会：鋼管充填コンクリート調合設計・施工指針(案)・同解説，pp.96-98，2021
- 8) 日本コンクリート工学会：品質評価試験方法研究委員会報告書，pp.8-12，1998