

画像解析とAIを活用した現場受入れコンクリートの全数管理の適用と展開

大成建設（株）

フェロー会員 ○大友 健

同 上 正会員 畠山 峻一 正会員 渡邊 高也

同 上 正会員 直町 聡子 正会員 川田 淳

1. はじめに

著者らは生コンクリートの現場受入れ試験として長年行われてきたスランプ試験を代替える手法として、アジテータトラックのシュートを流下するコンクリートの画像を解析し AI によりスランプ値を全数判定する手法の開発に取り組んできた¹⁾。

2020 年度には「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」を活用して²⁾、国土交通省の4直轄現場で、強度や流動性の大きく異なるスランプ・スランプフローのコンクリートについて、現場施工への適用を行うことで様々な知見を得、この手法を実際の品質管理に適用する効果を確認した（図-1）。また、天ヶ瀬ダムの大深度立坑内のトンネル覆工工事³⁾では、単位水量、空気量や圧縮強度も含めた全数モニタリング手法についても検討し、これに加えて坑内を無人とできるモニタリングシステムの構築にも取り組んだ。本稿では、これら手法の事例と効果を紹介するとともに、今後の展開について述べる。

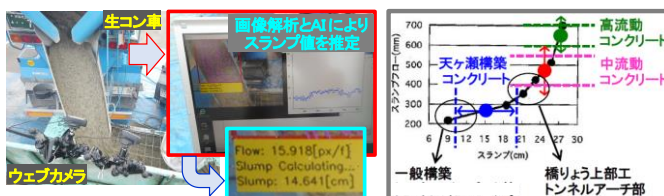
2. 画像解析とAIを活用した全数計測管理手法

図-2 に画像解析と AI によるスランプ推定手法の概念を示す。生コンクリートの受入れ時にトラックアジテータのシュートを流下するコンクリートの動画を撮影し、この画像から検知した流量・流速・シュート角度により AI がシュート流下画像データベースに基づいて自動的にスランプ値を推定する計算式を算定して、スランプを判断するものである。推定したスランプ値は即時にクラウドに送信され、品質管理システムの保有するコンクリートの荷卸し開始・終了の時間情報から生コンクリート運搬車1台毎のスランプ値を定義する。そしてこの値タブレット画面上に運搬車1台分単位の情報として表示リアルタイムに参照できるシステムとしている。

ここで、シュート流下画像データベースの取得にあたっては、図-3 に示すようにスランプの大小に加えて、キーワード スランプ、品質管理、全数管理、画像解析、AI、PRISM

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株) 土木本部土木技術部 TEL03-5381-5043

2019 年 度 試 行 「 画 像 か ら ス ラ ンプ 値 を AI 判 定 す る 全 数 計 測 」 に よ り
 ・普通スランプのほか中流動コンや高強度コンなど幅広いコンクリートについて、従来のサンプル調査との代替性を評価
 ・全数調査時の管理基準の考え方を検討、技術基準の改定案を示す



スランプ・単位水量とともに空気量・温度測定も全数化、圧縮強度の全数推定も可能とする(追加の目標)

画像データベースの取得と実施工での精度の検証(十直轄4工事)

図-1 2019 年度追加 PRISM の試行内容 文献2)を編集

● 現行の手法



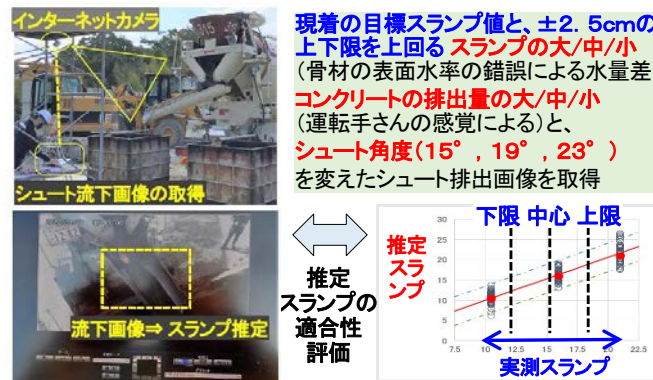
・構造物種類によるが生コン車5〜35台毎
 ・遠隔立会するにしても、撮影者と監督者は拘束
 ・試験車以外の品質は不明
 ⇒クラウドや動画を利用するならもっと違う方法があるのでは？

● 代替手法を提案



⇒将来の維持管理に反映するには？ ⇒単位水量とスランプの他も全量化

図-2 コンクリート現場受入れに全数検査を導入



実際作業におけるポンプホッパーへの投入のランダムさをAIで評価

図-3 シュート流下画像の取得とAI学習の手法

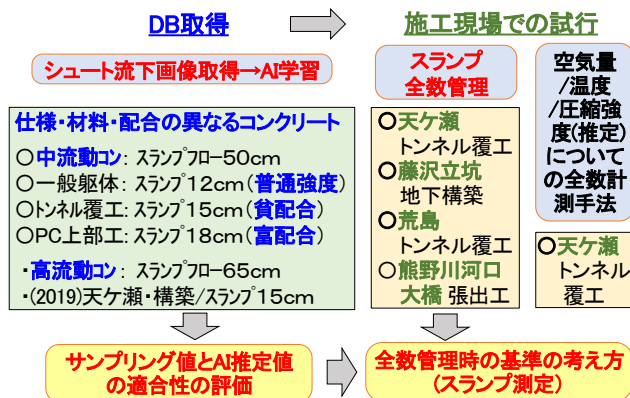


図-4 コンクリートの種別と試行現場

シュート角度の大小と排出の方法をパラメータとした。実際の施工においてスランブが上下動する現象については様々な原因があるが、ここでは実験の再現性も考慮し、細骨材の表面水率の設定の相違による実質の単位水量差を要因とした。そして、目標スランブ値程度のコンクリートに加え、通常の管理範囲である $\pm 2.5\text{cm}$ の下限を下回る硬さ、上限を上回る柔らかさのコンクリートも製造し、これらについて、様々な排出方法でのシュート流下状況の画像データを取得するものとした。これら画像の解析に基づき、推定スランブ値がサンプリングによる実測スランブ値と規格範囲の全域でおおむね同じとなるようにAIに学習させるものとしている。

3. 種々のコンクリートに対するスランブAI推定

図-4に、調査検討のフローを示す。文献1においてスランブAI推定の成果を報告した天ヶ瀬ダムはスランブ15cmの構築用コンクリートでの施工であったが、2020年度は工種がトンネル覆工となりスランブフロー50cmの中流動コンクリートでの施工となった。他の国交省工事でも工種が異なることで、結果的にスランブ12cm～スランブフロー65cmの様々なコンクリートのスランブ（フロー）推定の可能性を検討することができた。

国交省ではすでに全数管理が適用されている事例⁴⁾があり、たとえば出来形管理において検測をUAVやT.S.で行う場合には計器を指定することで測定誤差も規格値に含まれることになる。ところが地盤改良工等を対象とし「施工履歴データを用いて」管理および監督検査を行う手法では、平面はT.S.検測であるが、深度方向の検測に施工履歴データを使用するにあたって機械そのものあるいは計測システムの精度確認を求めている。

この要領で求める精度確認の文言を今回使用した「スランブの全数計測装置」として置き換えれば、図-5に示すように「必要な計測精度を満たすスランブ連続測定装置」であることを「当該現場に納入するコンクリート」について「施工着手前に実施したものであること」が精度確認の要件となる。

ここで図-3に示した画像データベース取得～AI学習のプロセスをこの精度確認に利用できるものと考えた。すなわち、3種類のスランブの各々の1台分の運搬車ごとに、シュートを流下するコンクリートのスランブ判定が適正にスランブを評価できているとすれば、AI推定値は一定のばらつきの正規分布となるはずである。そこで、AI推定の精度を、その推定が正規分布であることを前提に、AI推定の平均値とサンプリングによるスランブ値との偏差と、その偏差の標準偏差により評価するものとした⁵⁾。

図-6には、4種類のスランブコンクリートについてのサンプリングのスランブ値とAI推定のスランブ値と

「〇〇〇要領」(案)の文章を書き換えると・・・

⇒〇〇〇〇管理要領(案)「参考資料-3 精度確認試験結果報告書」の「2. 実施方法」による精度確認試験結果を受理し、必要な計測精度を満たす「スランブ全数計測装置」であることを確認する。
※精度確認試験は「当該現場に納入するコンクリート」について、
施工着手前に実施したものであること。

→精度確認に、DB取得のプロセスを利用可能

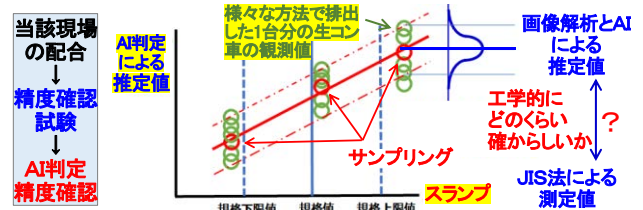


図-5 AI推定における精度確認の考え方

●天ヶ瀬構築:	C=386kg/m ³ , W/C: 44%, スランブ15cm
●藤沢立坑躯体:	C=320kg/m ³ , W/C: 53%, スランブ12cm
●熊野川上部工:	C=522kg/m ³ , W/C: 34%, スランブ18cm
●荒島T覆工:	C=285kg/m ³ , W/C: 59%, スランブ15cm

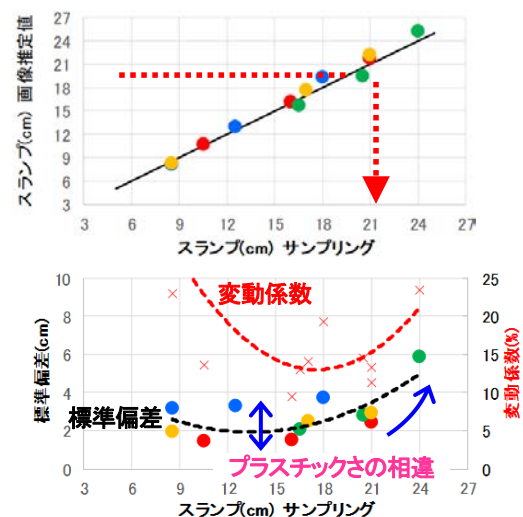


図-6 スランブAI推定の偏差と標準偏差

の関係、AI 推定の偏差の標準偏差との関係を示す。スランブ 8cm～21cm の範囲で、AI 推定の平均値の偏差はおおむね 1cm 程度以内となり、異なる材料・配合であっても、同じ AI アルゴリズムによってスランブが推定できることがわかった。偏差の標準偏差はスランブの大きさによってはあまり変化せず平均では 2～3cm 程度であるが、コンクリートによってはこれより大きくなるものもあった。しかしながら水セメント比と単位セメント量が大きく異なる天ヶ瀬ダム的一般配合と熊野川河口大橋の富配合、荒島トンネルの貧配合には差がない。定量的な表現ではないが、標準偏差の大きいコンクリートはプラスチックさが不足しているように思われるものであった。

現行の手法では、生コンクリート運搬車から採取した試料に対して JIS 法による測定を行っている。この時のスランブ測定の際につきそのものは $\pm 2.0\text{cm}$ (標準偏差 1.0cm) となるデータが公表されている⁶⁾のに対して、排出方法を大きく変化させて計測した時の AI 推定値の際につきそのものは、これよりも大きいと評価されるものとなった。

4. 実施工におけるスランブ全数測定と推定精度

藤沢立坑の実施工における全数計測状況の例を図-7 に、サンプリングのスランブ値あるいはその補間値と AI 推定値の時刻歴変化を図-8 に示す。AI 推定値 1 点 1 点にはある程度ばらつきがあるため、施工中のスランブ変化のトレンドを移動平均で表示している (この図では 5 区間)。同図のヒストグラムは、AI 推定値のサンプリングのスランブ値に対する偏差の分布を表示したものである。AI 推定の全数測定値を区間平均とすることで、この偏差の標準偏差がサンプリングのスランブの偏差とおおむね同等となる傾向が認められた。

図-9 には、藤沢立坑に加え、熊野川河口大橋、荒島トンネルの現場の実施工で得られた AI 推定スランブの偏差の標準偏差も示す。右図の縦軸は、実施工時の偏差の標準偏差をデータベース取得時に得られている標準偏差で無次元化したものである。実施工時のばらつきはデータベース取得時の約 0.5 倍であり、平均として 1.5cm 程度である。

いずれの現場測定においても、偏差の標準偏差は、データベース取得時よりも実施工時が小さい値となった。データベース取得ではシュート角度と排出方法を大きく変化させているのに対して、実施工では、ポンプホップに対する運搬車の付け方が一定でシュート角度にそれほど変動がないこと、コンクリートの排出の方法も工事特性に合わせてある程度は一定になること、が影響しているのではないかと考えられる。

移動平均の区間数を 3 区間とすれば、これが 1.15 cm

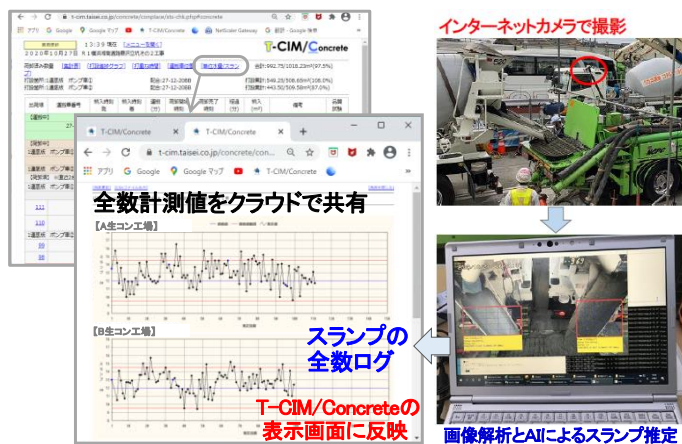


図-7 藤沢立坑における全数測定の実施状況

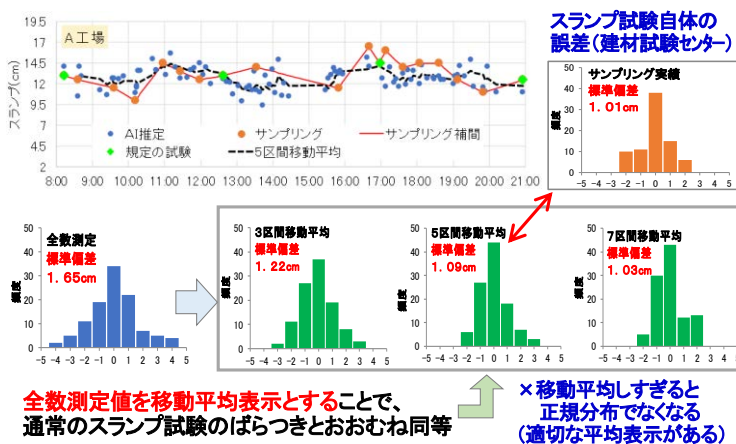


図-8 藤沢立坑における全数測定状況と偏差の標準偏差

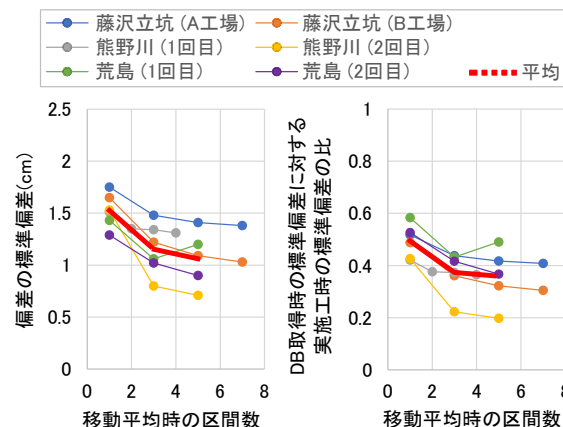


図-9 実施工において得られた偏差の標準偏差の区間平均による変化

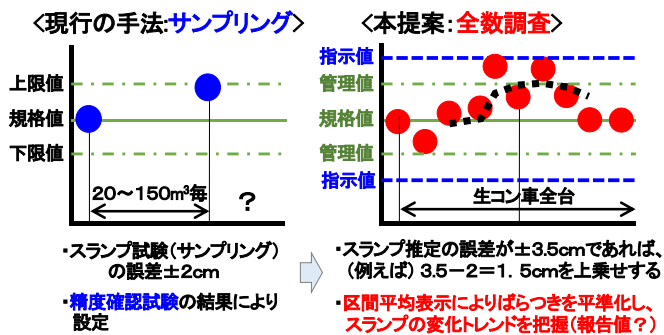


図-10 全数管理時の品質基準の考え方の例

程度まで低下し、サンプリングのスランプの測定のみばらつきの標準偏差である 1.0cm により近づいてくる傾向にあった。このような特性を考慮すれば、全数計測の管理では、図-10 に示すように、現行のサンプリング手法に相当する上下限の規格範囲に関する管理値については、区間平均値により評価する方法が考えられるのではないかとと思われる。

5. 天ヶ瀬ダム覆工コンクリートでの品質計測手法

2019 年度の天ヶ瀬ダムの工事は地上における躯体構築であったが、2020 年度は、中流動コンクリートによるトンネルのインバートおよびアーチ部の施工であり、図-11 に示す方法でコンクリートの受入れと現場内でのトンネル坑内への小運搬を行った。

図-12 に示すように、地上での生コン車から 5m³ ホッパへのコンクリート投入時と、地下で 5m³ ホッパから生コン運搬車に荷受けして移動したのち、ポンプのホッパへの投入時の各々で、シュートを下流するコンクリートの画像を撮影し、スランプフロー値の全数推定を行った。

この時単位水量についても RI 連続単位水量計 (COARAI) による全数計測も行っているが、今回の施工では、ポンプがトンネル坑内にあるため、単位水量はトンネル内のポンプの配管位置で測定している。荷卸しのスランプ画像採取によるスランプフロー値推定のタイミングと、単位水量の測定のタイミングが異なることから、単位水量値の 1 台毎の識別には、ソイルアンドロック社開発の測域センサによる運搬車自動識別システムを使用し、この情報をクラウド型のコンクリート品質管理システム T-CIM/Concrete に転送し、タブレット上の表示で、スランプフローと単位水量の両方について、受入れ運搬車 1 台毎の情報として表示できるシステムとした。基本的に、品質計測に関わる操作については坑内を無人として、スランプ計測・単位水量計測とも、トンネル内の WiFi を経由してリモートで地上からの制御を可能としている。

トンネル構内の状況と中流動コンクリートの状態およびスランプフローの推定状況を図-13 に示す。

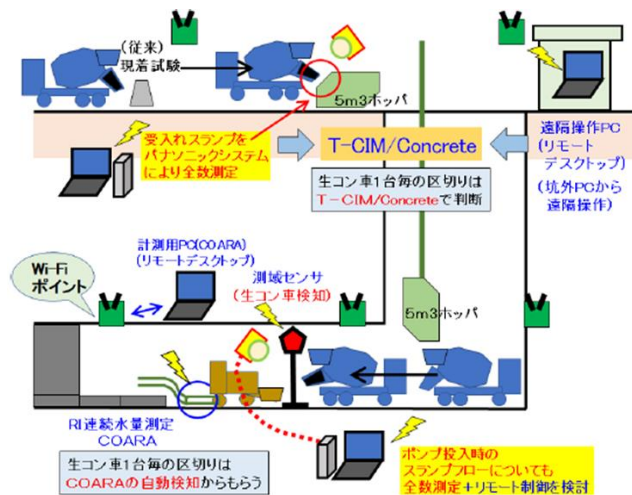


図-11 天ヶ瀬ダムトンネル部の施工と管理の概念

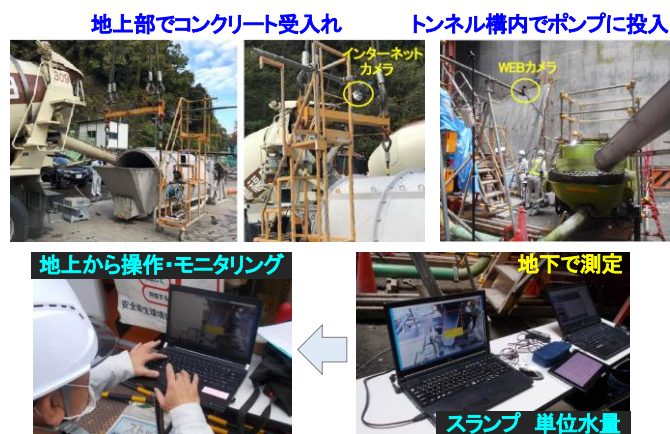


図-12 地上・地下での画像モニタリング状況



図-13 トンネル構内状況とスランプフロー推定

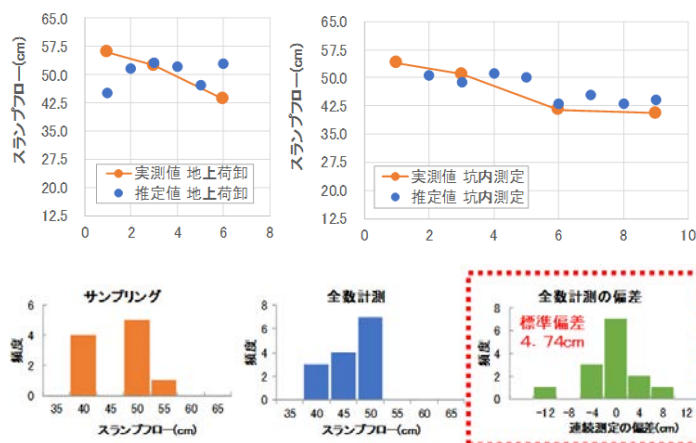


図-14 インバート施工時のスランプフロー変動状況



図-15 アーチ施工時のスランプフローの変動状況

6. スランプフロー全数計測データとその分析

工事における品質計測では、通常の生コン車からサンプリングしておこなう通常のスランプフロー試験と、シュート流下画像の解析とAIによるスランプフローの推定値の両計測を行い、これら値の偏差と偏差の標準偏差を確認した。図-14には、インバート施工時に測定したスランプフローの変動状況を、図-15には、アーチ部施工時に測定したスランプフローの変動状況を示す。

ここで、インバート施工時のスランプフローのAI推定方法は、スランプの推定と同じように、シュートを流下するコンクリートの流速と流量からスランプフローの大きさを推定するアルゴリズムによるものである。

図-9に示すように、スランプのコンクリートにおいては、AI推定のスランプ値のサンプリング値との偏差の標準偏差は1.5cm程度で、スランプの規格範囲 $\pm 2.5\text{cm}$ に対して約60%となっていた。インバート施工時のスランプフロー値の推定では、偏差の標準偏差は4.74cmとなり、スランプフロー50cmの規格範囲 $\pm 7.5\text{cm}$ に対しても約60%となることから、スランプと同様にスランプフローも同じように推定できているといえるものであった。

これに対して、インバートについてのスランプフローAI推定では、図-16に示す「ビンガム流体のすべりを伴う管内流動原理の概念」を用いてスランプフロー推定のアルゴリズムを改良している⁵⁾。中流動・高流動のコンクリートでは、コンシステンシーが大きくなった時に粘性が大きくなるので、いわゆる流動性が大きいのに流下速度が小さくなる現象が生じる(図-17の左図)が、流下断面内での速度差に基づく図-16の方法によれば、流下の速度によらずスランプフローが推定できるものとなる。この方法を適用したアーチ部のスランプフローの全数推定では、偏差の標準偏差は2.40cmまで小さくなる結果が得られている。

7. 単位水量・スランプ以外の品質に関する全数計測管理方法の検討

現場における受入れ検査のメニューでは、スランプ・単位水量以外に、空気量・温度・塩化物量を測定し、圧縮強度用のテストピースも採取するため(図-2)、これらのすべてが全数でクラウド上に蓄積されるようにす

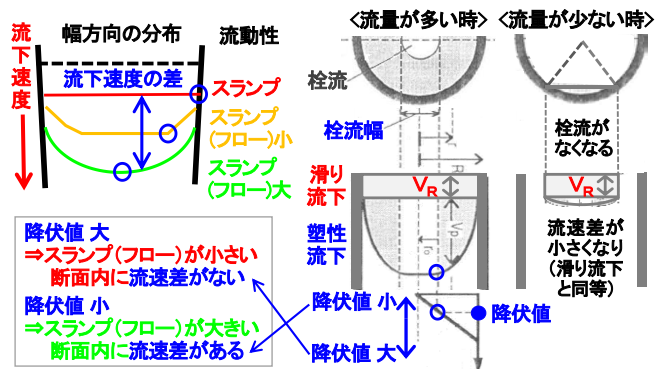


図-16 ビンガム流体のすべりを伴う管内流動原理

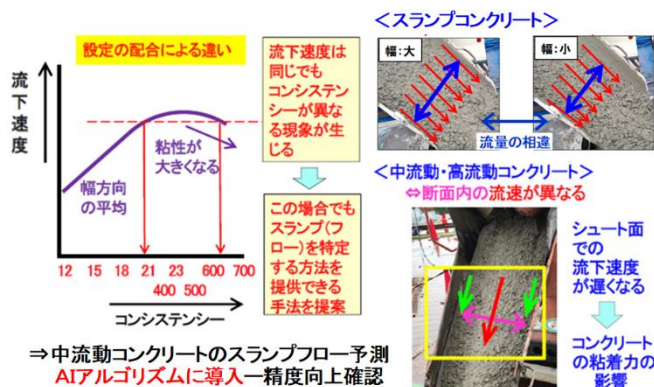


図-17 中流動・高流動コンでの流下状況の相違

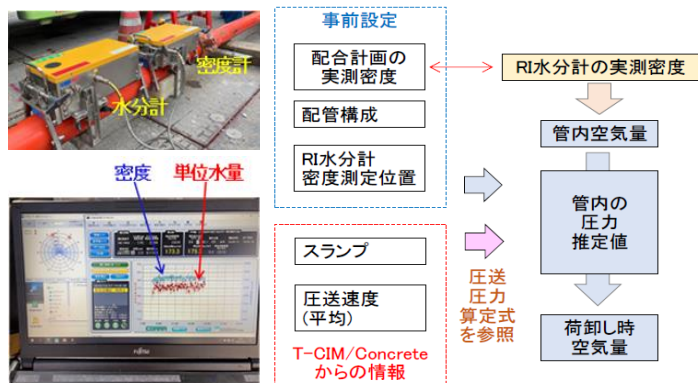


図-18 RI 単位水量計の計測値からの空気量算定

ることが理想的である。

RI 方式による連続単位水量測定においては、図-18に示すように、単位水量の全数値と同時に密度計によりコンクリートの単位容積質量も計算されている。ただし配管内のコンクリートは圧送圧を受けていることから、管内の作用圧力によって見かけの空気量が減少することとなる。コンクリートは非圧縮流体とみなせるため、ボイルシャルルの法則が成立するので、これを換算すれば荷卸しの空気量と一定の関係が認められるはずである。

本年度は、推定精度は別として、取得した単位水量と密度の全数計測値から空気量の全数を算定し、T-CIM/Concrete の管理画面上に表示するシステムを構築した。また圧縮強度についてもセメントの計量値を設定し、実測の単位水量値を参照したセメント水比と空気量からこの推定値を算出して表示できるようにした。実施工のプロセスでの PC 画面への表示の実績を図-19 に示す。

8. 全数計測値の共有による品質向上効果

実際の施工において、全数計測値について T-CIM/ Concrete の管理画面を用いて生コン工場と情報共有を行った時のスランプの管理状態の変化を、スランプコンクリート（荒島トンネルの覆工施工時）について図-20 に、中流動コンクリート（天ヶ瀬ダムアーチ施工時）について図-21 に示す。

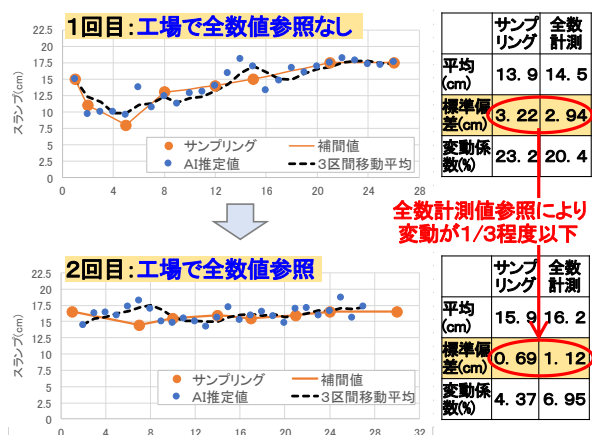


図-20 生コン工場と情報共有を行った時のスランプの管理状態（荒島トンネル）



打設日:2021年02月22日 工事名:天ヶ瀬ダム再開発流入部本体他建設工事

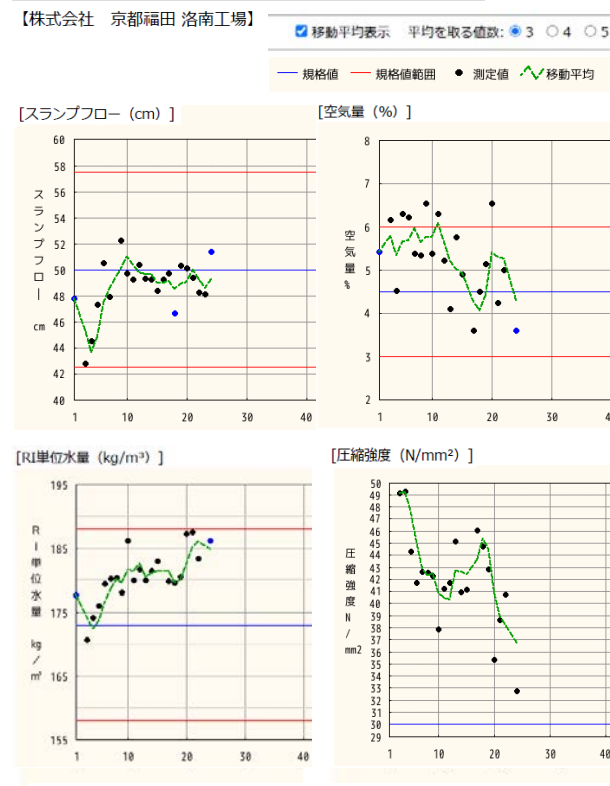


図-19 全数測定値の PC 画面への表示状況

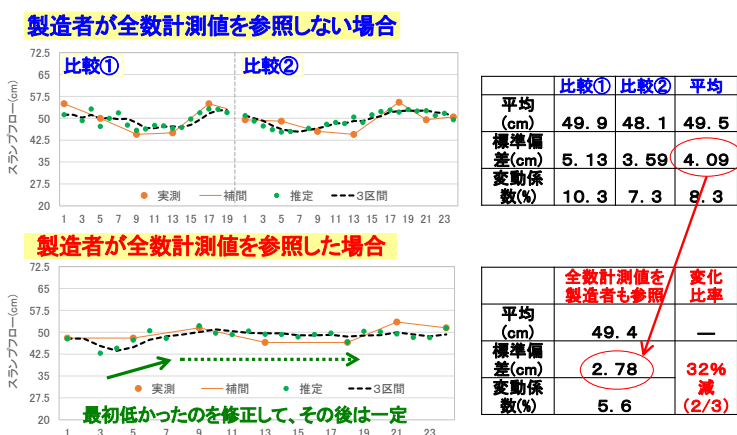


図-21 生コン工場と情報共有を行った時のスランプフローの管理状態（天ヶ瀬トンネルアーチ部）

荒島トンネルでは、製造者が現着コンクリートのスランブをリアルタイムに知ることによってスランブ（サンプリング値）の変動が1/3程度にまで低減された。天ヶ瀬ダムの場合も、スランブフロー（サンプリング値）の変動が60%程度までに抑制されている。このような傾向は、2019年度に行った天ヶ瀬ダムの躯体構築での製造・施工においても確認されており³⁾、全数計測のリアルタイムのモニタリングが品質の安定化に効果を及ぼしていると言えるものである。

9. AI/IoT 活用の全数管理手法の今後の展開

前章までに紹介した受入れコンクリートの全数管理システムの手法と効果については、i-Construction(コンクリート工)におけるサプライチェーンの効率化の目的に対して「電子化された生コン情報の活用」の一つの具体的手法と位置付けられる⁷⁾に至っており(図-22)、第10回のコンクリート生産性向上検討協議会(2021.2.9)においても、この成果が日本建設業連合会より報告⁸⁾され、「試験や検査の合理化は、従来の方法を代替できる方法を複数考えていき良い方法を使用するという方向性で進める」との議事もいただいている。

また、2020年度のプリズムの試行結果についても、「データ活用による建設現場の生産性向上ワーキンググループ」より、以下の意見をいただいた。

- ・品質管理の向上に資するものと評価できる。
- ・各種のコンクリート配合で適用が可能と試行結果が出たと言える。省力化への寄与度も高い。更なる精度向上と同時に圧縮強度の推定へ拡大する事が望まれる。また、このシステムを活用するための品質基準・JIS改定について整理を進めること。
- ・「管理基準案」の策定のために、受発注者を含む関係者で合意形成を図る必要がある。

前述のように空気量・圧縮強度については2020年度の検討では精度の検証まではいたっていないので、今後、各種コンクリートに対するコンシステンシー評価実績の蓄積・改善に加え、これらの従来の方法を代替できる全数計測についての検討を継続する予定である。さらに、図-23に示すように、全数調査手法の現場実装に向けての基準の改定案の整理が期待されている⁹⁾ことから、ここで報告した様々なデータを、スランブ（フロー）推定精度の定義や実際の工事での品質管理方法の設定等に生かして、監督・供給・施工の三者にメリットがあり納得できる管理手法のあり方について検討していきたいと考えている。

従来の管理方法では20～150 m³に1台分の運搬車の品質情報しか知りえなかったことに対して、運搬車全台の品質情報をリアルタイムにかつ生コンクリート供給者とも共有することで品質を向上させる効果に加えて、電子化された生コン情報の活用のそのものによっても現場での生産性を向上できることも確認されている¹⁰⁾。また、異なるセクター間で受け渡される全数管理情報を将来の維持管理に活かす仕組み¹¹⁾についても検討を継続している。

最後になりますが、ここで報告した成果については、官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）を利用して国土交通省が実施する「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」制度（2019年度追加分）を活用して行った「大成建設、成和コンサルタント、横浜国立大学、パナ



図-22 電子化された生コン情報の利用方法 文献7)に加筆

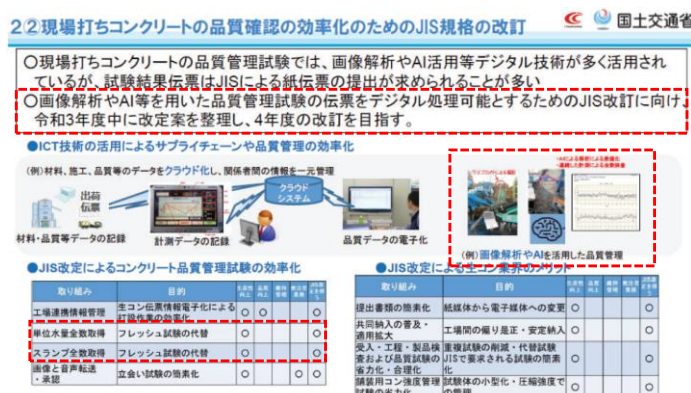


図-23 国土省令和3年度の取り組みから 文献9)に加筆

ソニックアドバンステクノロジー，ソイルアンドロックエンジニアリング コンソーシアム」の業務内容の一部であることを付記します。本報告はコンソーシアム代表者である大成建設からとしているが，この成果にはコンソーシアム構成社の各担当者の尽力があったことも申し添えるものです。

参考文献

- 1) 大友健ほか：クラウド型品質管理システム T-CIM/Concrete を利用したコンクリートの全数品質管理手法，第 2 回 i-Construction の推進に関するシンポジウム，2020. 7. 2
- 2) 国土交通省ホームページ：試行内容（概要）の紹介 資料-2，No. 14，<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001356734.pdf>
- 3) 竹中宏徳ほか：生コン情報の活用等により生産性向上と品質管理の高度化を図ったコンクリート躯体工事—天ヶ瀬ダム再開発トンネル流入部建設工事—，コンクリート工学，Vol. 58，No. 6，2020. 6
- 4) 国土交通省ホームページ：令和 3 年度向け「ICT の全面活用」を実施する上での技術基準類，たとえば施工履歴データを用いた出来形管理の監督・検査要領（表層安定処理等・中層地盤改良工事編）（案），https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosei_constplan_tk_000031.html
- 5) 大友健ほか：画像解析と AI を活用したフレッシュコンクリートのコンシステンシー評価手法の全数管理への適用性，コンクリート工学，Vol. 59，No. 7，2021. 7
- 6) 建材試験センター：工業標準化法 J N L A 制度における測定の不確かさの推定及び技能試験用試料開発に係る調査委託業務成果報告書，2005. 3
- 7) 国土交通省ホームページ：コンクリート生産性向上検討協議会（第 10 回・令和 3 年 2 月 9 日），資料-1 これまでの主な議論について，<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001387419.pdf>
- 8) 国土交通省ホームページ：コンクリート生産性向上検討協議会（第 10 回・令和 3 年 2 月 9 日），資料-3 サプライチェーンマネジメント等の検討，<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001387421.pdf>
- 9) 国土交通省ホームページ：建設現場の更なる生産性向上に向けて～令和 3 年度 i-Construction の主な取り組みについて～（令和 3 年 4 月 1 日），参考資料，<https://www.mlit.go.jp/common/001397718.pdf>
- 10) 大友 健ほか：「生コン情報電子化」が打込み作業の生産性向上に及ぼす効果，コンクリート工学，Vol. 57，No. 11，pp. 861～869，2019. 11
- 11) 大友 健・前川宏一：電子化した生コン情報をクラウド上で共有し CIM モデルと連携—製造・施工・検査の全数情報の取得と活用の試み—，土木学会誌，pp. 32～33，2020. 10