

ICT を活用したコンクリートの状態の「見える化」技術による品質確保・向上

鹿島建設(株) 正会員 ○水野 浩平 鹿島建設(株) 正会員 田口 翔也
鹿島建設(株) 正会員 大橋 雅恵 鹿島建設(株) 正会員 松本 修治
鹿島建設(株) フェロー 渡邊 賢三 鹿島建設(株) フェロー 柳井 修司

1. はじめに

近年、建設業界においては、労働者の高齢化や若年入職者の減少が著しく、労働者不足の問題が顕在化しており、熟練労働者から若年入職者への技術および技能の伝承がし難い状況となっている。これらの問題を解決するため、データとデジタル技術によって商品やビジネス、業務、企業文化等の変革を成し遂げるデジタルトランスフォーメーション¹⁾ (以降、DX と記す) が建設業においても推進されている。また、国土交通省では、ICT や AI・画像分析を活用したインフラ DX を達成するため、「i-Construction²⁾」などの取組みが推進されている。その中でも、コンクリート工事は、何十年も前から変わらず多くの労働者が必要で、技術者や技能者の経験に依存するような施工が行われている。そのため、技術および技能をデジタル化し、データに基づく計画・管理により、現場施工の経験が浅い労働者でも品質と生産性の両立を実現できる現場改革が求められている。そこで、筆者らは、コンクリート工事の計画立案から施工を経て検査に至るまでの全ての工程をデジタルデータとして「見える化」するシステム「CONCRETE@i³⁾」を構築している。本システムは、技術者の経験知やコンクリートの状態を見える化し、品質確保・向上の PDCA サイクルにおける、即時の C (チェック) とデータベースに基づく振り返りの P (プラン) および A (アクション) を実現するものである。本稿では、本システムの概要と、現場への適用実績について述べる。

2. 「CONCRETE@i」の概要

CONCRETE@i は、**図-1** に示すように、コンクリート工事一連の工程である計画、製造、運搬、受入れ、圧送、打込み・締固め、打継面の処理または仕上げ、養生から検査に至るまでの一連の工程を、AI・画像分析を活用してデータで見える化する 10 個の要素技術で構成される、施工支援システムの総称である。①施工情報をリアルタイムでデジタルデータ化し、状況判断を高速化する、②画像データを含む施工情報を、受発注者双方の工事関係者と遠隔現場で共有し、品質管理・施工管理および検査を高度化・省人化する、③各工程の情報をクラウド上に保存し、施工データと品質データを紐づけて分析し、生産性と品質の向上の PDCA サイクルに役立てる、④施工情報のエビデンス管理とトレーサビリティを容易にする、等の特徴を有する。これらは、コンクリート構造物の品質確保・向上、さらには生産性の向上に大きく寄与するものと考えられる。

3. 構成要素技術

本稿では、CONCRETE@i を構成する 10 個の要素技術のうち、品質確保・向上の観点から特に重要な 6 つの技術について、その概要を示す。

(1) 計画立案

コンクリート構造物の品質確保・向上を実現するためには、適切な打設計画を立案することが重要である。「打設計画支援システム」

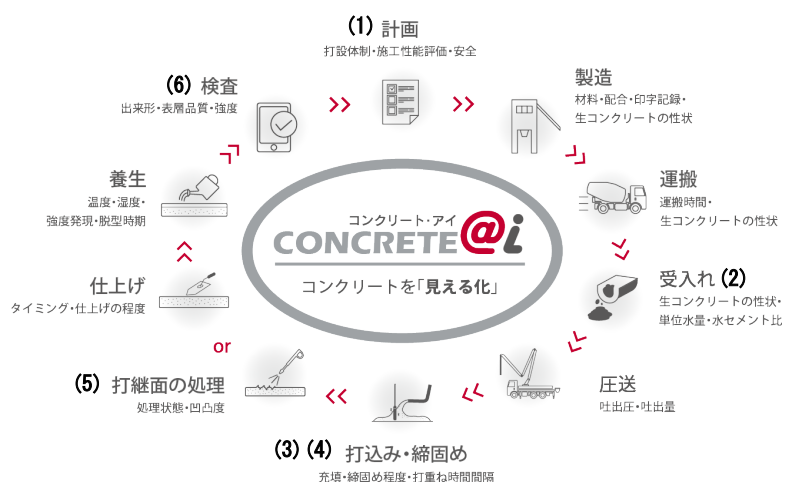


図-1 CONCRETE@i の模式図

キーワード コンクリート, AI, ICT, データ, 見える化, 表層品質

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-489-8014

は、コンクリートの打設計画の策定にあたり考慮すべき条件・項目をWEB上で共有可能なシステムから入力、確認できるものである。本システムは、**図-2**に示すように、①土木学会コンクリート標準示方書に記される標準値を逸脱する不適切な入力に対してアラートを出して適切な計画に導く、②関連する他現場の実績やトラブル事例を入力画面から効率よく参照できる、③現場や関連部署の管理者もリアルタイムで同じ情報をWEB上で確認できる、④スランプや圧縮強度などの品質管理試験データを容易に閲覧できる、⑤同種工事の過去のトラブル事例を閲覧できる等の特徴を有する。

(2) 受入れ管理

一般に、生コンクリートの購入者が行うスランプ試験等のコンクリートの受入れ検査は、20~150 m³に1回の頻度⁴⁾で行われている。しかし、検査対象外のコンクリートの中で要求性能を満足しないものや、検査を行い要求性能を満足したものでも、その後の時間経過に伴いワーカビリティが低下することで、配管閉塞や充填不良を引き起こすものもある。そのため、受け入れるコンクリートを全数・全量にわたって荷卸し直前に施工性の良否を確認することが望まれる。ただし、これは多大な労力を伴い現実的でない。「全量受入れ管理システム⁵⁾」は、施工性に劣るコンクリートを人手をかけず自動的に検知し排除することを目的に、アジテータ車のシュートを流下するコンクリートをビデオカメラで撮影して、スランプ・スランプフローをリアルタイムに推定するものである。本システムは、**図-3**に示すように、ビデオカメラ、パトランプおよび専用のアプリをインストールしたPCで構成される。アジテータ車とそのシュート部をビデオカメラの動画からAIが検知して測定対象範囲を自動抽出し、その範囲内を流下するコンクリートの勾配の変化に着目して瞬時にスランプを推定する⁵⁾。あらかじめ設定しておいた閾値をもとに、受入れの可否を判定し、判定が不可であればパトランプによりアラートが発信される。本システムを用いることで、施工性の劣るコンクリートを見逃すことなく確実に排除することができる。

(3) 打込み管理

コンクリートの打込みに際しては、打重ね時間間隔や打込み間隔などを適切に管理する必要がある。しかし、大量のコンクリートを広い面積に複層で打ち込む場合には、許容打重ね時間間隔の超過によるコールドジョイントや、コンクリートの横移動による材料分離を生じる危険性がある。「打込み管理システム⁶⁾」は、これら品質低下につながる事象を防止するために、ビーコンを利用して筒先の位置や打重ねまでの時間経過を見える化するものである。本シ



図-2 打設計画支援システムの概要

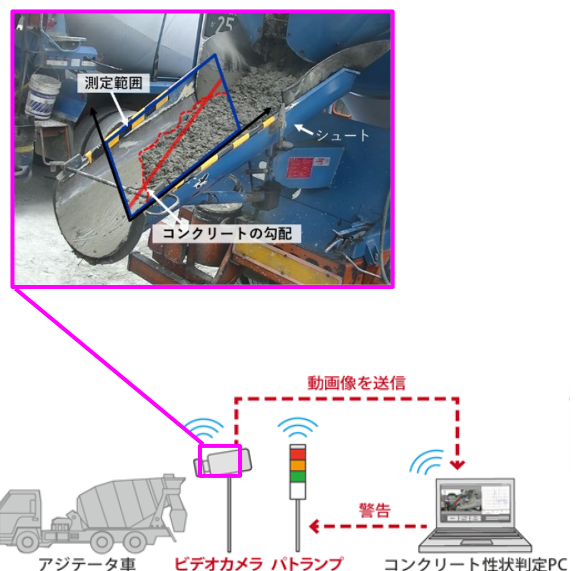


図-3 全量受入れ管理システムの概要

テムは、**図-4** に示すように、位置検知用のビーコンおよびスマートフォンで構成される。ビーコンは、計画した各打込み箇所近傍の鉄筋や型枠に予め配置しておく。スマートフォンは、コンクリートポンプのオペレータが装着し、筒先と一緒に移動することでビーコンの発する電波を捉えて筒先位置と時刻を検知・記録する。パソコンやタブレット端末には、**図-5** に示すように、筒先の位置と時間経過が図面上に表示され、許容打重ね時間間隔に近づくに従って表示色が変化することで、経過時間が視覚的に把握できる仕組みである。これらのデータはクラウドに転送・蓄積され、工事関係者が複眼でリアルタイムに閲覧できる。

(4) 締固め管理

コンクリートの締固めに際しては、構造物の品質を確保するために、バイブレータの振動時間や挿入間隔を適切に管理することが重要である。「AR 締固め管理システム⁷⁾」は、これらの管理を確実にを行うために、AR 技術を用いて締め固めた位置や時間を可視化するものである。本システムは、**図-6** に示すように、締固め作業者の腕に装着した携帯端末で、打込み箇所の周辺に設置した AR マーカを読み込むことにより携帯端末の位置を検知する。そして、LiDAR 機能によって締固め作業者の姿勢（腕に装着した携帯端末の高さが設定した高さより低くなると締固め）を認識する。これにより、締固め位置と時間を検知し、その結果が携帯端末および管理用パソコンに表示、記録される。携帯端末には、使用するバイブレータの締固め範囲と締固め時間が AR 上で着色して表示される。加えて、予め設定した締固め時間を経過すると完了通知音が発信される。また、バイブレータ挿入間隔の目安として 50 cm 間隔のメッシュも AR 上で表示され、締固め作業者はこれらの表示や完了通知音を確認しながら作業ができる。管理用パソコンには、図面上に複数の携帯端末から取得した締固め位置と時間が集約して示され、施工管理者は締固め作業の一元的な管理ができる。

(5) 打継面の処理の管理

コンクリート打継面の処理は、打継面のレイタンスや緩んだ骨材などを高圧洗浄によって除去し、目荒した程度を目視で定性的かつ主観的な良否判定で管理されている。打継面が適切に処理されないと、構造物としての一体性が失われ、漏水を引き起こしたり、水

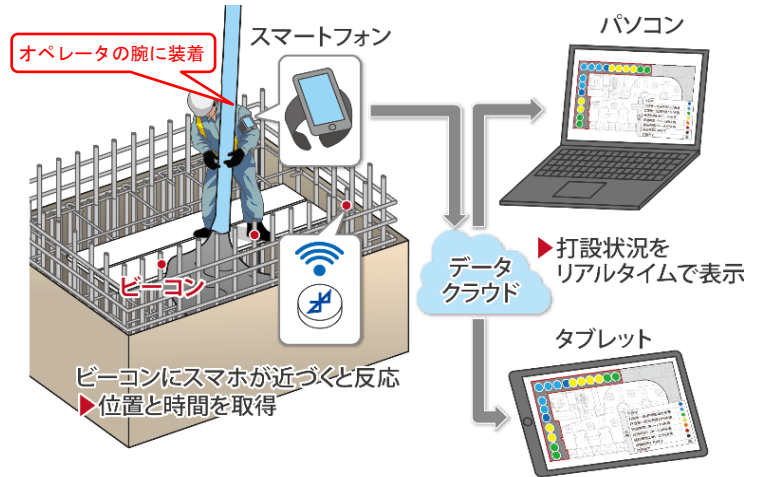


図-4 打込み管理システムの概要

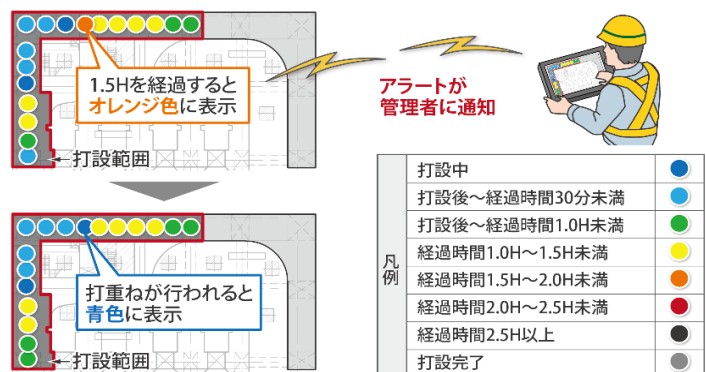


図-5 打込み管理システムの概要

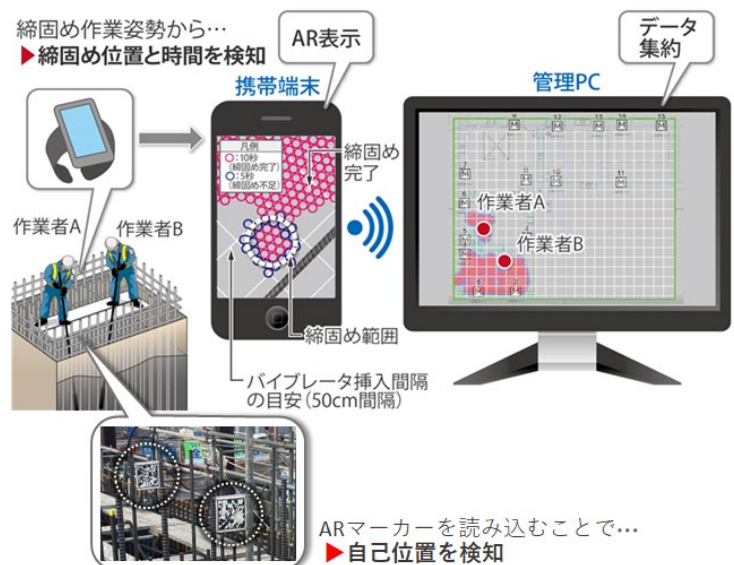


図-6 締固め管理システムの概要

や酸素、二酸化炭素、塩分などの劣化因子がコンクリート内部に浸透して鉄筋を腐食させ、早期に劣化を引き起こしたりする原因となる。このように、打継面の処理が構造物の機能・耐久性能に大きな影響を与えるにも関わらず、これまで、処理状態の良否を定量的に判定する基準がなかった。「打継面の良否判定システム⁸⁾」は、打継面の凹凸の状態、粗骨材の露出状態によって変化する輝度分布に着目し、輝度の分布度合いから打継目の良否を定量的に判定するものである。本システムは、**図-7**に示すように、タブレットに専用のアプリをインストールし、現場で撮影した打継面の画像を取り込み、評価したい範囲を選択するとメッシュが表示され、処理が十分な箇所は「青」、不十分な箇所は「黄」「赤」の順に段階的に表示される。

(6) 表層品質の管理

コンクリートの施工のよし悪しは、脱型後のコンクリート表面に現れる。「表面の色つや」、「沈みひび割れ」、「表面気泡」、「打重ね」、「型枠継目のノロ漏れ」および「砂すじ」の6項目を発注者と施工者が合同で目視調査し、サンプル標本写真と比較しながら評価点4, 3, 2および1に分類し0.5刻みで採点・評価を行う「目視調査による表層品質評価⁹⁾」

(以下、表層目視評価)が広く行われるようになっている。表層目視評価においては、技術者間で評価点の乖離があることや評価シートの点数入力に手間がかかることが課題であったが、「表層品質 AI 目視評価システム¹⁰⁾」は、タブレットで撮影した表層の写真からAIを用いて、その場で自動かつ一定の基準で採点を行うものである。本システムは、**図-8**に示すように、技術者が評価点を入力する際にAIによる評価点も同時に表示され、採点を補助する機能が備わっている。また、評価点は自動的にクラウドに蓄積され、同一工事内の採点結果の推移が即座に表示されるため、品質確保・向上のPDCAを効率よく行える仕組みとなっている。

4. 工事現場への適用

検討の対象は水処理施設の構築工事であり、躯体外壁ブロック①および②の2ブロックを対象に、前述の**3. 構成要素技術(1)~(6)**の技術を適用するとともに、各要素技術で得られたデータをクラウド上に保存・分析し、品質確保・向上のためのPDCAを実践した。施工ブロックの概要を**表-1**に示す。

(1) 計画

「打設計画支援システム」を活用することで、現場の若手技術者でも、土木学会コンクリート標準示方書に記される標準値や関連する他現場の実績などをワンクリックで参照し、基本に忠実な計画書の作成を効率的に行うことができた。

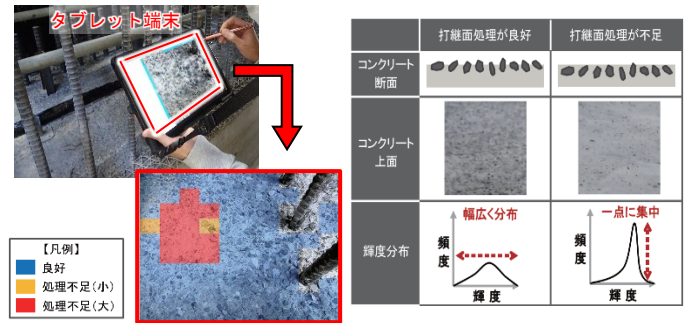


図-7 打継面の良否判定システムの概要



図-8 表層品質 AI 目視評価システムの概要

表-1 施工ブロックの概要

項目	ブロック①	ブロック②
数量	220 m ³	186 m ³
部材高さ	2.25 m	2.20 m
部材幅	4.0 m	4.0 m
部材延長	24 m	21 m
層数	5層	
表層品質評価測点	24 測点	

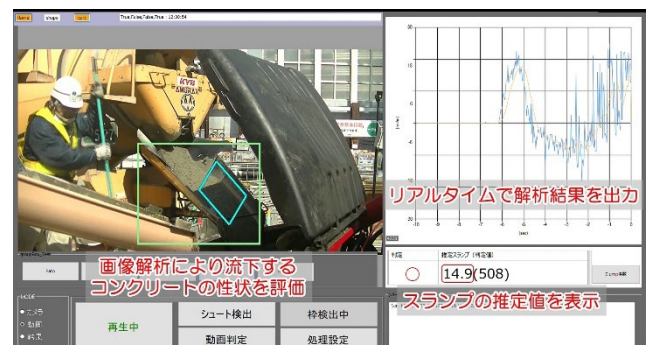


写真-1 全量受入れ管理システムの実施状況

(2) 全量受入れ管理

「全量受入れ管理システム」の実施状況を写真-1に、スランプのモニタリング結果の一例を図-9に示す。本システムによって、受け入れる生コンクリートの全数を管理し、スランプの変動をリアルタイムで把握することができた。なお、適用期間中にスランプが大きいことを知らせるアラートが発信されたものの、すぐに受入れを中断してスランプ試験を実施し、実測スランプが規格値(15.0±2.5 cm)内であったこと、生コンクリート工場の製造管理に問題がなかったことを確認した上で受入れを再開した。このように、データに基づいた判断と対処を即座に行うことができた。

(3) 打込み管理

「打込み管理システム」の適用の有無による打重ね時間間隔の最大値と平均値の比較を図-10に示す。システムなしは、躯体外壁ブロック①および②と同等の施工ブロックにおいて、打設管理者が記録紙に記入する一般的な手法で取得した33測点のデータを示す。なお、システムなしの打重ね時間間隔の最大値159分は、土木学会コンクリート標準示方書[施工編]に示される許容打重ね時間間隔の標準値を超過しているが、打込み後のコンクリートの凝結性状を確認し、上層と下層が一体となるよう入念な締固めを実施した。本システムの適用により、打重ね時間間隔の最大値および平均値が小さくなった。これは、打込み終了からの時間経過の「見える化」により打重ね時間間隔をリアルタイムに把握し、層厚を小さくして打重ね時間間隔を短くするなどの対処をタイムリーに実施できたことによるものと考えられる。

(4) 締固め管理

「AR締固め管理システム」のシステムの画面表示の一例を図-11に示す。携帯端末および管理用PCには、締固め位置と時間が表示され、一様に赤色に着色されていることが確認された。また、締固め作業者は、図-12に示すように締め固めた位置が赤色に着色されたことを携帯端末で確認するとともに、設定した締固め時間を経過すると発信される通知音を目安に締固めを完了することができた。また、施工管理者は、図に示すように、管理用PCで締固めの進行状況をリアルタイムに把握することがで

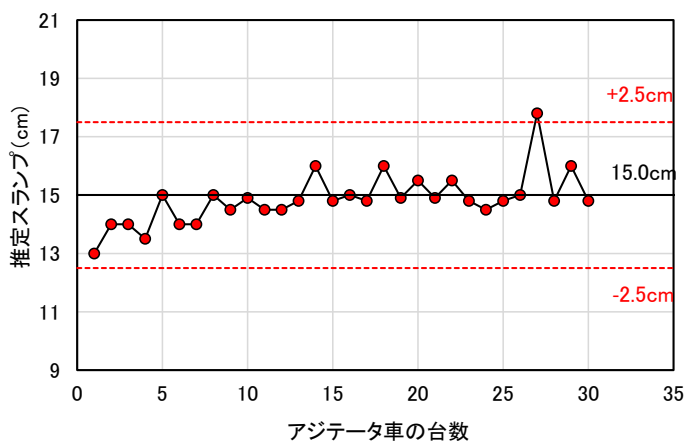


図-9 スランプのモニタリング結果の一例

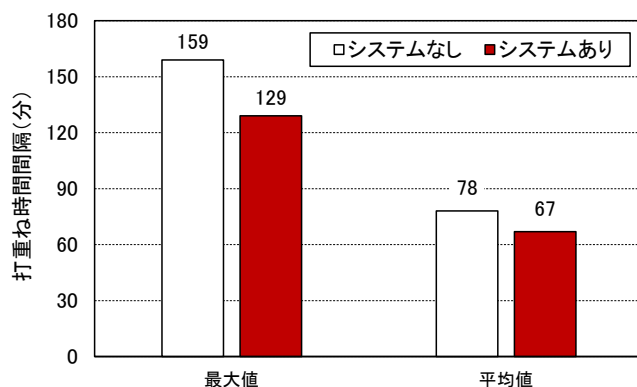


図-10 打重ね時間間隔の最大値と平均値の比較

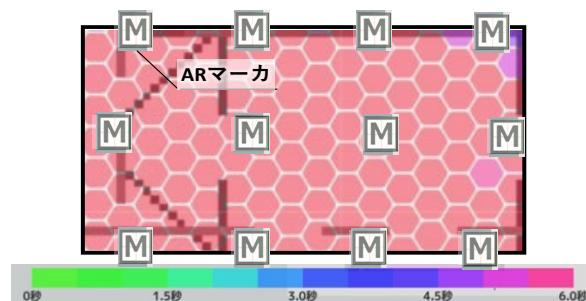
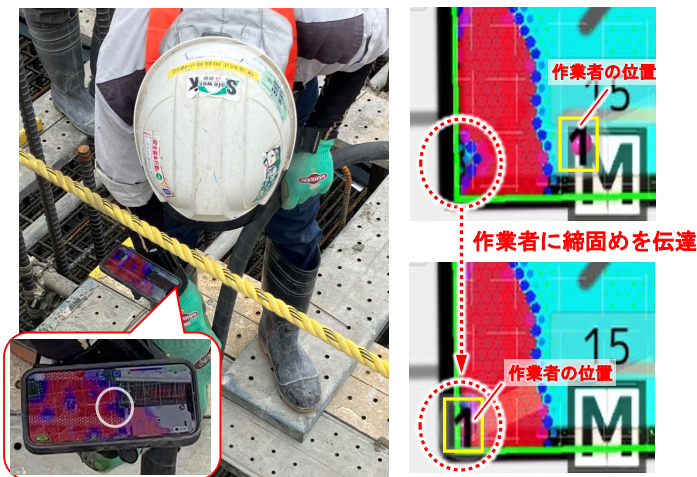


図-11 AR締固め管理システムの画面表示の一例



(施工中の携帯端末画面の一例) (施工中の管理PC画面の一例)

図-12 AR締固め管理システムの実施状況の一例

き、図中の赤丸箇所のように、締固め時間が不足している箇所を締固め作業員へ伝達し、当該箇所を改めて締め固めることで、バイブレータの締固め不足を防ぐことができた。

(5) 打継面の処理管理

「打継面の良否判定システム」による判定の一例を図-13に示す。なお、当該現場においては、仕上げ後に凝結遅延剤を散布し、翌朝に高圧水で洗浄する手法で、打継面の処理を実施した。赤色や黄色で示される処理が不十分な箇所が一部に発生したが、高圧水により再度打継面の処理を実施することで、定量的な判定に基づいて打継面の品質を確保できた。

(6) 表層品質の管理

「表層品質 AI 目視評価システム」によるブロック①の評価結果を図-14に示す。なお、本手法は、対象部位の品質を代表する一箇所の写真で評価するのが一般的であるが、ブロック①は延長 20 m 以上、高さ 2 m 以上で対象となる範囲が広いことから、網羅的に評価するために延長方向を 6 分割、高さ方向を 4 分割した合計 24 点で評価を実施し、評価の平均値と最大・最小値を図示した。6 項目ともに、3.0 以上の高い評価結果が得られたものの、表面気泡、打重ね、ノロ漏れおよび色つやの項目については、さらなる評価点の向上を目的に、後述するデータ分析による品質確保・向上のための PDCA を実践した。

(7) 品質確保・向上の PDCA の実践

ブロック①において各要素技術で得られたデータをクラウド上に保存し、ブロック②の品質確保・向上を目的に、データを活用した PDCA を実践した。層毎の打重ね時間間隔を図-15に、かぶり部に挿入した後追いバイブレータの 1 回あたりの締固め時間を図-16に示す。打重ね時間間隔は、プラントの昼休憩を挟む 2~3 層および 3~4 層において平均値、最小・最大の差が大きい結果であった。また、1 回あたりの締固め時間は、いずれの層においても土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] に示される締固め時間の標準範囲 5~15 秒を超過する場合もあり、締固めのばらつきが認められた。そこで、(i) 昼休憩後に打込み再開となる 3 層目においては層厚を小さくすることで当該層の打込みに要する時

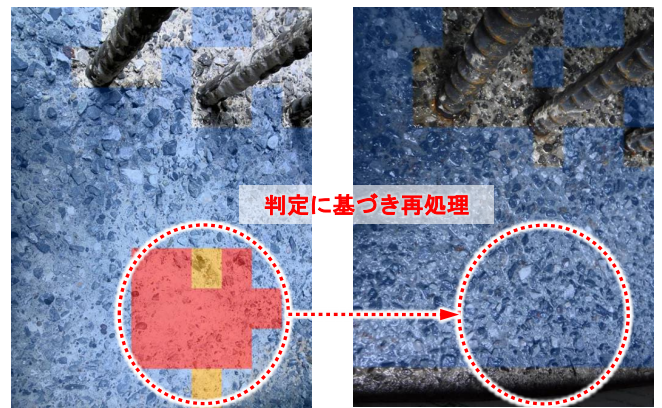


図-13 打継面の良否判定システムによる判定の一例

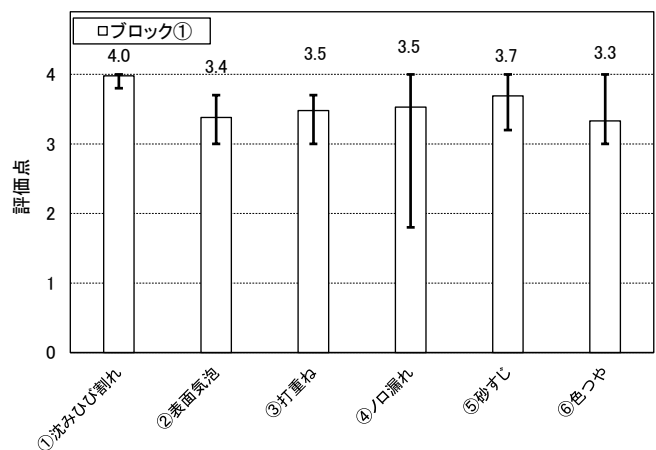


図-14 表層品質 AI 目視評価システムによる評価結果

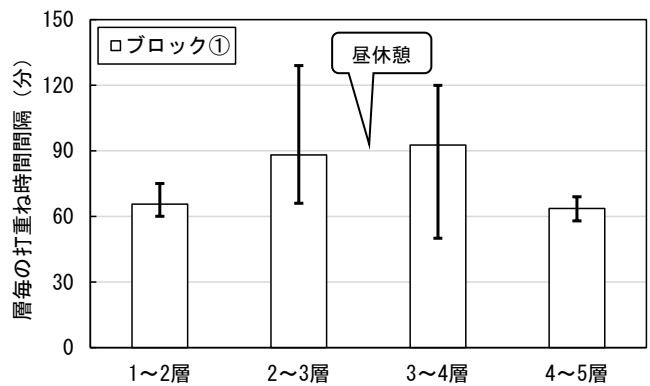


図-15 層毎の打重ね時間間隔 (平均値)

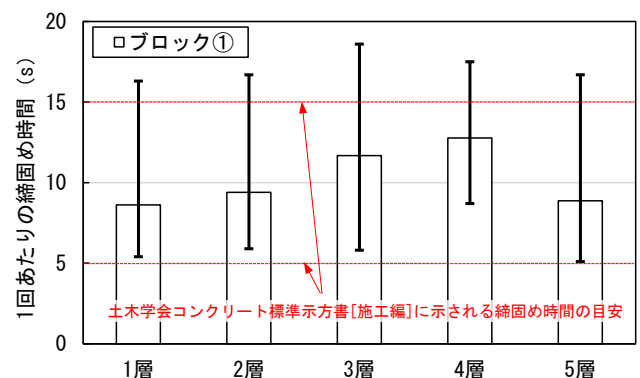


図-16 1回あたりの締固め時間 (平均値)

間を短縮し、ブロック全体として打重ね時間間隔の差異を小さくする計画、(ii)後追いバイブレータは、挿入位置を予めマーキングしておき、補助員が締固め時間を作業員に対して合図を出すことで、締固め間隔と締固め時間が一律となるようにする計画に改善し、PDCAのP(プラン)およびA(アクション)を実践した。その結果、**図-17**に示すように、打重ね時間間隔の最大値および平均値は、ブロック①と比較してブロック②では小さくなった。また、**図-18**に示すように、後追いバイブレータの1回あたりの締固め時間の標準偏差も同様に、ブロック①と比較してブロック②では小さくなった。先述の計画・管理の改善により、打重ね時間間隔と締固め時間のばらつきが低減したものと考えられる。

「表層品質 AI 目視評価システム」によるブロック①および②の評価結果の比較を**図-19**に示す。表面気泡、打重ね、ノロ漏れおよび色つやの項目については、ブロック①と比較してブロック②において平均値および最小値が高い結果となった。これは、先述の計画・管理の改善により施工のばらつきが低減し、品質と均質性の向上に寄与したものと考えられる。

5. おわりに

コンクリート工事の一連の工程のうち計画、受入れ、打込み・締固め、打継面の処理および検査において、「CONCRETE@i」によりデータで品質と施工を「見える化」して、計画・管理することができた。また、取得したデータをクラウド上に保存・分析し、品質確保・向上のためのPDCAを実践することで、表層品質の評価点を向上させることができた。今後、AI・画像分析、AR、センサ、ICT技術等を活用し、コンクリートの状態や作業状況を見える化する技術の開発、現場展開を加速させ、品質を確保しながら合理的な施工が行えるよう検討を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 今井紀夫：デジタルトランスフォーメーションとその背景の理解，日本マーケティング学会，マーケティングジャーナル，Vol.40，No.2，PP.65-73，2020.
- 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，pp.I_1-I_6，2017.
- 3) 柳井修司，渡邊賢三，橋本学，松本修治，水野浩平：コンクリートの状態・作業状況を見える化する「CONCRETE@i」～その構成技術と適用事例～，セメント・コンクリート，No.895，PP.31-37，2021.9.

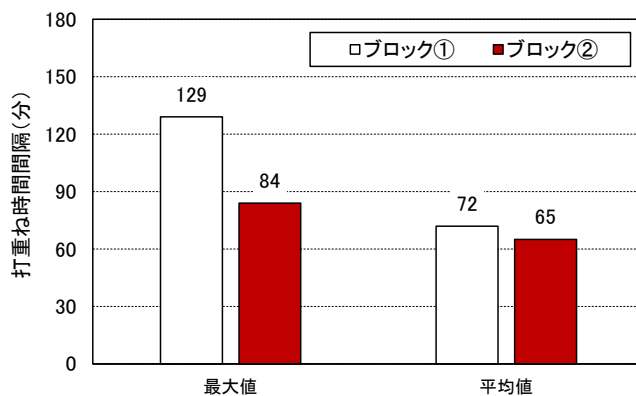


図-17 打重ね時間間隔の比較

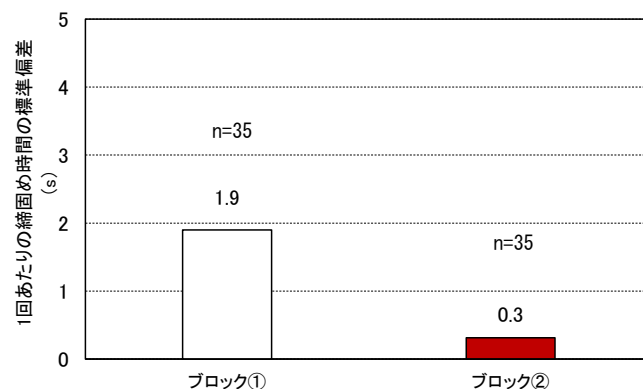


図-18 1回あたりの締固め時間の標準偏差の比較

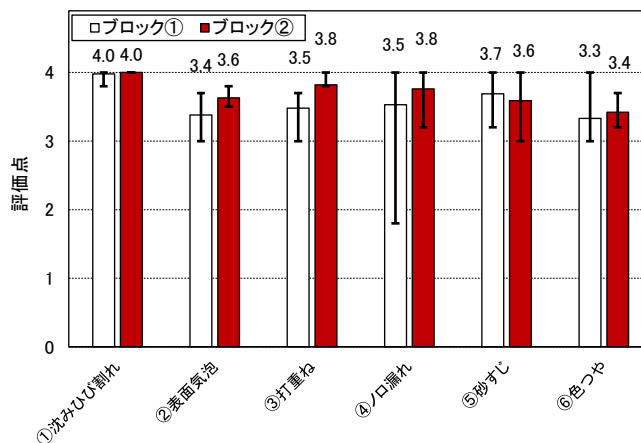


図-19 表層品質評価システムによる評価結果の比較

- 4) 2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 土木学会, 2012.3.
- 5) 倉田和英, 松本修治, 橋本学, 柳井修司: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, 2020.
- 6) 水野浩平, 上田智広, 西山卓朗, 向原健, 柳井修司, 渡邊賢三, 芦澤良一, 橋本学, 今野宏樹, 藤原康史: ビーコンを利用したコンクリートの打込み管理による品質確保・向上, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-663, 2023.
- 7) 大橋雅恵, 水野浩平, 芦澤良一, 青木康治, 高木秦雅, 坂村幹也, 柳井修司, 小林光, 山崎文敬: 締固め位置と時間を可視化したコンクリートの締固め管理システムによる品質確保, 土木学会第 78 回年次学術講演会公演概要巻, VI-65, 2023.
- 8) 松本修治, 今井道男, 横関康祐, 林大介, 曾我部直樹: 画像による打継面の処理状態の簡易評価方法の検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-448, pp.895-896, 2015.
- 9) 坂田昇, 渡邊賢三, 細田暁: コンクリート構造物の品質向上と表層品質評価手法, コンクリート工学, Vol.50, No.7, pp.601-606, 2012.
- 10) 濱田那津子, 中村真人, 有坂壮平, 渡邊賢三: 機械学習を活用した目視評価による表層品質評価システムに関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, 2020.