

コンクリートの状態を見える化する 「CONCRETE@i」の概要と施工事例

水野浩平・柳井修司・渡邊賢三

コンクリート構造物の品質確保・向上を実践するためのシステム「CONCRETE@i[®]」の構築に取り組んでいる。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、養生および検査において、コンクリートの“状態”や作業“時間”をリアルタイムにデータとして見える化し、その場で即時に改善するOODAと、データベースに基づく振り返りのPDCAを実現するものである。ここではCONCRETE@iの概要とこれらを活用した施工事例について紹介する。

キーワード：インフラ、コンクリート、ICT、品質確保・向上、PDCA

1. はじめに

近年、建設業界においては、技術者・技能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、熟練者から若年入職者への技術および技能の伝承が難しい状況となっている。これらの問題を解決するため、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⁾が建設業においても推進されている。国土交通省では、全ての建設生産プロセスにおいてICT等を活用することで生産性向上を図り、魅力のある建設現場を目指す取組みである「i-Construction」²⁾を推進している。また、内閣府では、科学技術イノベーションの創出に向けた、官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）制度を設け、AI、IoTをはじめとする新技術を試行することにより建設現場の革新を目指し、生産性を向上するための研究開発を促進している。その取組みの一環で、国土交通省主導のもと「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」が2018年度より開始されている。

このような背景のもと、筆者らは、土木のコンクリート工事の各工程をデジタルデータとして“見える化”するシステム「CONCRETE@i[®]」（以下、本システム）³⁾の構築に取り組んでいる。本システムは、コンクリートの“状態”や作業“時間”をリアルタイムにデータとして見える化し、その場で即時に改善するOODA（Observe, Orient, Decide, Act）ループと、データ

ベースに基づく振り返りのPDCA（Plan, Do, Check, Action）を実現するものである。ここではその概要と、PRISMを通じ現場に適用し施工した事例について紹介する。

2. 本システムの概要

本システムは、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・画像分析等を活用してデータで見える化する10項目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ータ化し、状況判断を誰でも化・高速化して作業と状態を改善する（OODA）、②画像データを含む施工情報を、受発注



図-1 本システムの模式図³⁾

者双方の工事関係者と遠隔臨場で共有し、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を図る(PDCA)、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る。

3. 構成要素技術

本稿では、本システムを構成する10項目の要素技術のうち、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」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関連する現場の実績やトラブル事例を入力画面から効率



図-2 打設計画支援システムの概要

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過去の施工実績から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、20～150m³に1回の頻度³⁾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場合もある。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。「全量受入れ管理システム⁴⁾」は、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。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。

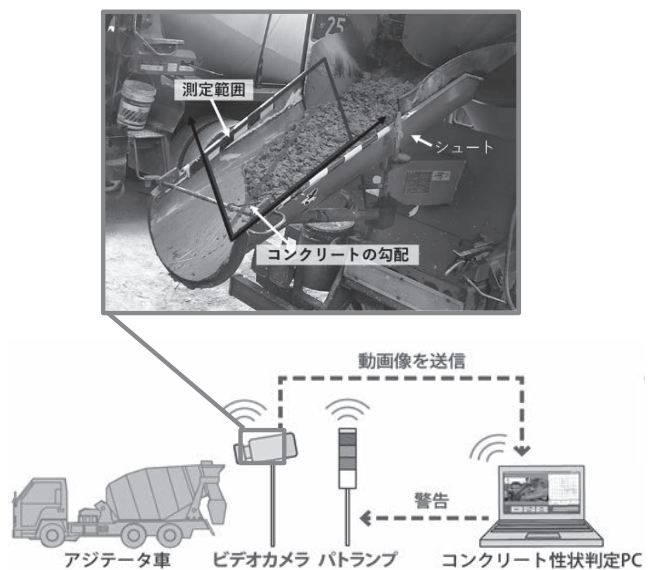


図-3 全量受入れ管理システムの概要⁴⁾

(3) 打込み管理

コンクリートの打込みに際して、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⁵⁾」は、これら品質低下につながる事象を防止するために、Bluetooth を発する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。本システムは図-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、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わることによって、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。

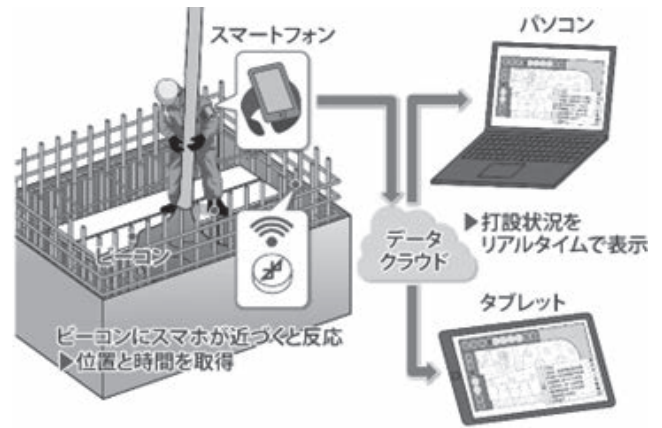


図-4 打込み管理システムの概要⁵⁾

(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⁶⁾」は、これらの管理を確実に行うために、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-5 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 マーカー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。

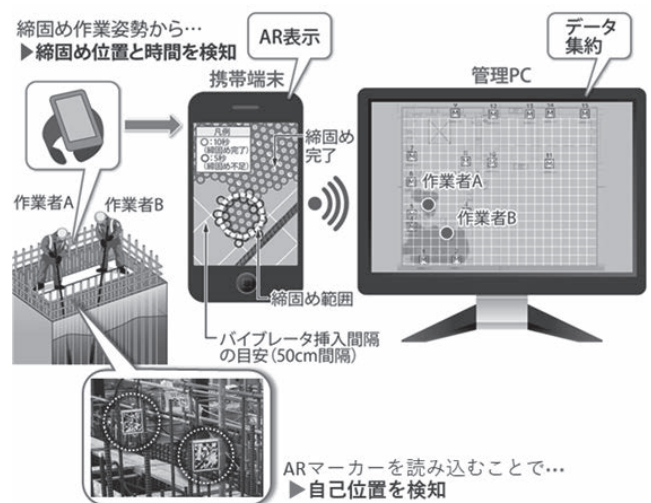
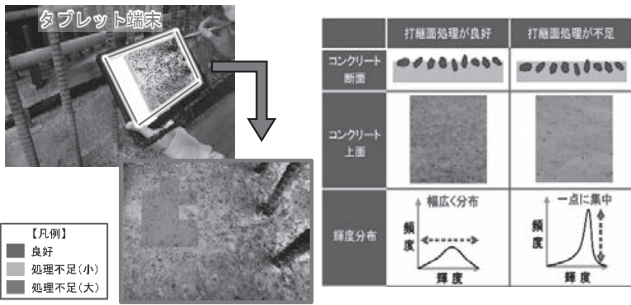


図-5 締固め管理システムの概要⁶⁾

(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。「打継面の良否判定システム⁷⁾」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-6 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。輝度変化に基づく打継面の処理の定量的な評価が実施できる。



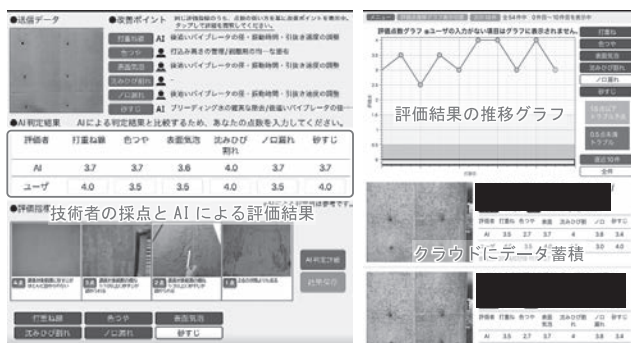
図一六 打継面の評価システムの概要⁷⁾

(6) 表層品質の管理

コンクリートの施工の良し悪しは、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⁸⁾」(以下、表層目視評価)が広く行われるようになってきている。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⁹⁾」は、タブレットで撮影した表層の写真から、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、図一七に示すように、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

ここでは、国土交通省関東地方整備局発注の東京外環中央 JCT 北側ランプ (その2) 工事、および東京都下水道局発注の江東ポンプ所江東系ポンプ棟建設その2



図一七 表層品質 AI 目視評価システム⁹⁾

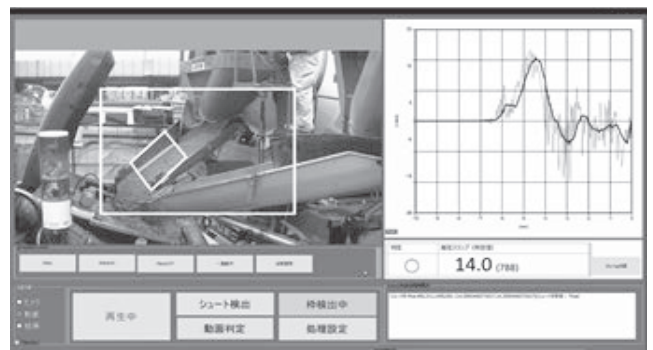
工事において、本システムを適用した結果を紹介する。

(1) 東京外環中央 JCT 北側ランプ (その2) 工事

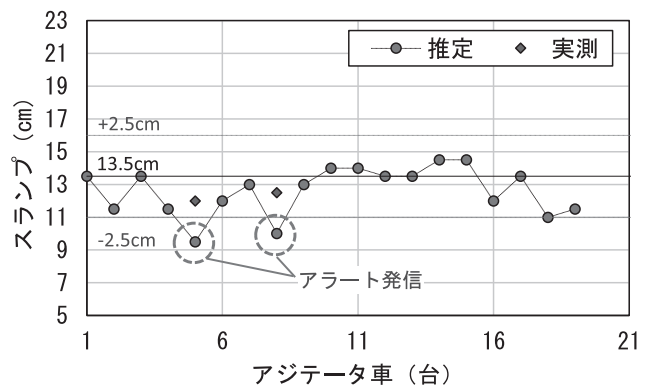
高速道路のボックスカルバート側壁部の3ブロックを対象に、前述の3. 構成要素技術のうち(2) 受入れ管理および(5) 打継面の処理の管理の技術を適用するとともに、遠隔臨場による検査の実施、CIMモデルと紐づけたクラウドでのデータ共有を行った。ここでは、令和2年度PRISMの一環で試行した内容を抜粋し、事例を紹介する。

(a) 全量受入れ管理

「全量受入れ管理システム」による判定画面の一例を図一八に示す。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小さいことを知らせるアラートが2回発信されたものの、直ちに受入れを中断してスランプ試験を行い、実測スランプが規格値(13.5±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うえで受入れを再開した(図一九)。このように、データに基づいたOODAのO(判断)、D(意思決定)とA(実行)を即座に行うことができた。



図一八 全量受入れ管理システムの判定画面の一例



図一九 全量受入れ管理システムによる判定結果の一例

(b) 打継面の処理管理

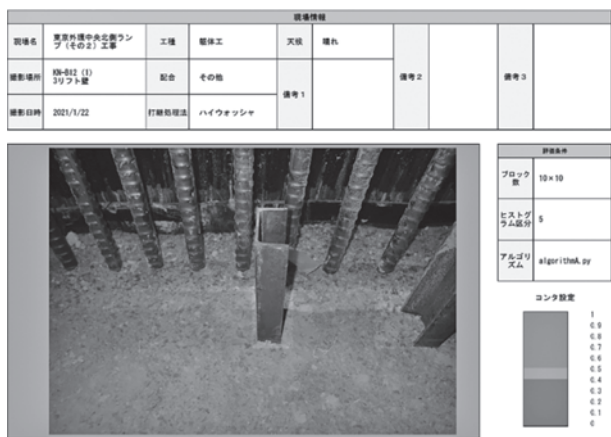
「打継面の良否判定システム」による判定の一例を図一10に示す。対象部位の打継面は、仕上げ後に凝結遅延剤を散布し、翌朝に高圧水で洗浄により処理を行った。なお、ごく一部で判明した「黄」判定箇所については、ワイヤブラシ処理を実施することで「青」判定となり、その場で打継面の処理を是正し、定量的な判定に基づき打継面の品質を確保できた。

(c) 遠隔臨場による検査

遠隔臨場による立会検査の状況を写真一1に示す。設置したカメラや現場職員が携行するタブレットから得られる画像（コンクリートの状態）と良否の判定状況を、検査官が現場に出向くことなくリアルタイムに共有して検査を実施できた。また、検査帳票を各システムから直接作成することで、検査の高度化に加えて書類作成に掛かる時間が90分から5分に短縮され、省人化も実現できた。

(d) CIM とのデータ連携

CIM とのデータ連携の一例を図一11に示す。施工部位の品質情報・施工情報を構造物のCIMモデルと紐づけて、ボタン一つで表示できるようにした。クラ



図一10 打継面の良否判定システムによる判定の一例



写真一1 遠隔臨場による立会検査の状況

ウドを活用することでエビデンス管理とトレーサビリティが容易となり、発注者と施工者がいつでも情報を共有できることが示された。

(2) 江東ポンプ所江東系ポンプ棟建設その2工事

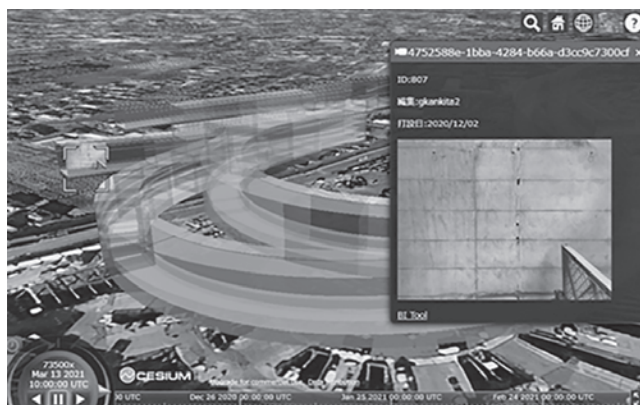
水処理施設の躯体外壁の2ブロックを対象に、前述の3. 構成要素技術のうち(1)計画,(3)打込み管理,(4)締固め管理および(6)表層品質の管理の技術を適用するとともに、各要素技術で得られたデータをクラウド上に保存・分析し、品質確保・向上のためのPDCAを実践した。ここでは、令和3年度PRISMの一環で試行した内容に加え、現場の創意工夫により品質確保・向上のためのPDCAを実践した事例を紹介する。

(a) 計画

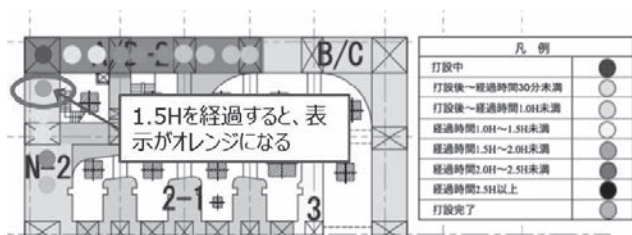
「打設計画支援システム」を活用することで、現場の若手技術者でも、土木学会コンクリート標準示方書等に記される標準値や関連する他現場の実績などをワンクリックで参照して計画を効率的に立案し、計画書作成に要する作業時間が通常の60分に対して40分と30%程度短縮できた。

(b) 打込み管理

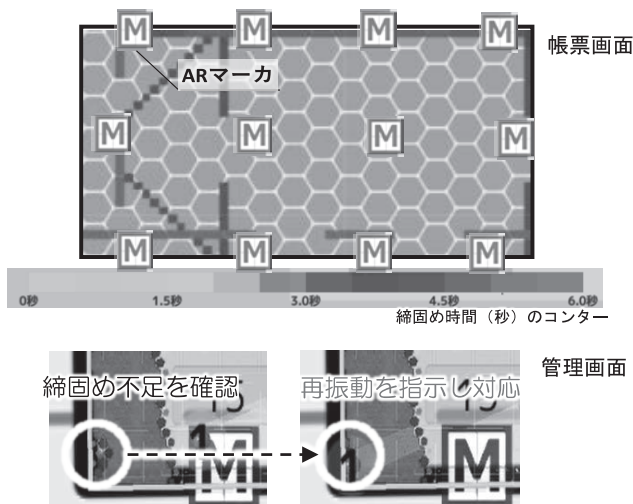
「打込み管理システム」による画面表示の一例を図一12に示す。本現場では、打重ね時間間隔1.5時間を示すオレンジ色の表示を打重ね時間間隔の上限値の目安として、打込み（筒先）位置毎の表示色に基づき、経



図一11 CIM との連動の一例



図一12 打込み管理システムによる画面表示の一例



図一13 AR 締固め管理システムの画面表示の一例

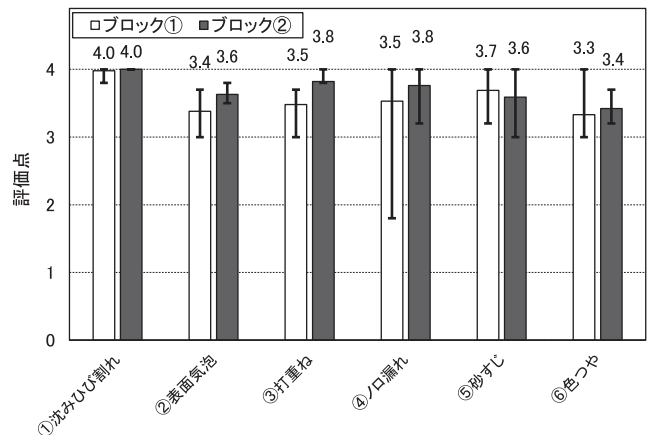
過時間を視覚的に把握し管理できた。

(c) 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一13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。締固め作業者は、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し、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、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き、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、全ての施工範囲においてバイブレータの締固め不足を防ぐことができた。

(d) 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。データ分析(Check)により、打重ね時間間隔がプラントの昼休憩を挟む層において大きく、後追いバイブレータによる締固め時間は作業員によるばらつきが大きいことが判明した。そこで、(i) 昼休憩後に打込み再開となる層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間を短縮し、ブロック全体として打重ね時間間隔を小さくする計画、(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PlanからActionを実践した。「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一14に示す。表面気泡、



図一14 表層品質 AI 目視評価システムによる評価結果

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

国土強靱化を見据えた高速道路や水処理施設などの都市インフラの整備にあたり、自然環境や地理条件の影響が大きい建設業においては、他産業と性格・性質を異にするところは多々あるものの、全ての生産プロセスにおいて、情報化、機械化および自動化による省人・省力化、さらには無人化による生産性向上の実現が強く望まれている。コンクリート工事は、これまで、熟練技術者が持つ経験と勘および知識に基づき、品質確保を実現してきた。品質を確保しつつ生産性を向上させるには、それらを活かすためにも、技術・技能を継承しつつ、施工データを集積し、これを分析・活用した先端技術が必要である。今後、今回紹介したICT等を活用した技術などにより、コンクリートの状態や作業状況が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・向上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。

JICMA

《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・作業状況が見える化する「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

- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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

[筆者紹介]

水野 浩平 (みずの こうへい)
鹿島建設(株)
技術研究所 土木材料グループ
主任研究員



柳井 修司 (やない しゅうじ)
鹿島建設(株)
技術研究所 土木材料グループ
担当部長



渡邊 賢三 (わたなべ けんぞう)
鹿島建設(株)
技術研究所 土木材料グループ
グループ長

