

コンクリート締固め管理システムの実用化に向けて 多様な現場への適用を可能とするシステム更新

仲 条 仁・宇 野 昌 利・前 田 真 護

我が国の建設工事の現場施工品質は、作業員が有する経験知や技能に支えられている面が多く存在し、コンクリート工事、特にコンクリートの打込み及びバイブレーターによる締固め作業もその例外ではない。そのため、筆者らは、コンクリート工事の締固め作業員の動画を撮影し、人工知能（AI）技術を活用した画像処理を行い、締固め箇所を定量的にデータ化する技術及びシステムを開発、実際の現場に導入することで、従来の作業員の経験による個人のノウハウを利用した定性的な管理から、定量的な管理を実現した。

本稿では、当該システムを多様な現場へ適用・展開していくため、実現現場への適用により明らかになった課題について対策を検討、システムへの改修・改善を行った内容に関して報告するものである。

キーワード：コンクリート打設、締固め管理、画像解析、人工知能、リアルタイム

1. はじめに

我が国の建設業を取り巻く環境は、ITの進歩により劇的に変化しつつある。その変化の中心は、ディープラーニングなどの人工知能技術の進展によるところが大きい。

一方、建設業でよく利用されるコンクリート工事の流れは、①コンクリートプラントで製造、②フレッシュコンクリートをアジテータ車を利用して現場に搬入、③型枠内にコンクリートを打込む、④バイブレーターによる締固め、⑤表面の仕上げ、⑥コンクリート面の養生、これら作業は30年以上前からほとんど変わっていない。

加えて、コンクリート工事の品質管理は、作業員のノウハウによることが多く、作業員の経験に基づくものであり、脱型後、概ねコンクリートの品質は良好な状態であるが、まれに、豆板などのトラブルが発生する場合もある。一旦トラブルが発生すると、発注者との協議により対策を検討し、例えば、補修・補強工事が必要となる。最悪の場合、壊して再構築となり、多くの時間とコストが別途必要となる。

コンクリート工事の締固め作業に着目すると、トラブルの原因は締固め不足に伴う充填不良であることが多い。締固め不足を未然に防ぐためには、締固め箇所をリアルタイムに把握し、コンクリートが固まる前に締固め不足箇所を検知・検出し、当該箇所に対して再締固めすることが課題解決につながる。

そこで、筆者らは、コンクリートの締固めにおけるバイブレターの差し込み振動位置を3次元で正確に計測し、施工時間と対比して、どこをいつ締固めたかを定量的、かつリアルタイムに把握ができるシステムを開発した。当該システムは、実際のコンクリート打設現場（試行現場）にて大量の教師データ動画を取得し、それによりAI学習モデルを構築したものであるが、対象現場以外への適用・実施を考えると、いくつかの課題が確認された。本稿では実施面の課題を整理するとともに、その対策としてのシステム改修・改善内容に関して報告するものである。

2. コンクリート締固め管理システムの概要 と多様な現場への適用・展開に向けた課題

筆者らはコンクリート締固め作業時に管理すべき情報（①バイブレーター挿入平面位置、②バイブレーター挿入深さ、③バイブレーター挿入時間の3点）をAIや画像処理技術を活用して自動計測するシステムを開発した^{1), 2)}。当該システムは、締固め状況をリアルタイムに近い時間で取得、可視化することで、作業履歴の管理を可能とし、締固め不足を予防するシステムである。その概要を以下に記述する。

(1) 締固め管理システムの概要

(a) 締固め位置把握の概要

締固め位置の把握手法は、図—1に示す通り、今

井ら^{3), 4)}が考案したものを基本的に採用した上で、解析結果表示のリアルタイム性を確保するため改良および新規機能を構築したものである。

具体的には、締固め作業員のヘルメットに装着したウェアラブルカメラで現場状況を撮影し（図-2）、その動画を図-3のように画像解析AIモデルを用いてARマーカー、ホースの先端、並びに先端位置のカラーリングを検出、ARマーカー（図-4）との相対的な位置から締固め位置を特定するとともに、バイブレーターのカラーリング（図-5）から深さを特定する。

(b) システム概要

本システムは、撮影から解析処理・結果表示までをリアルタイム化することを目的の1つとするため、クラウドを活用したシステム構成を構築した（図-6）。

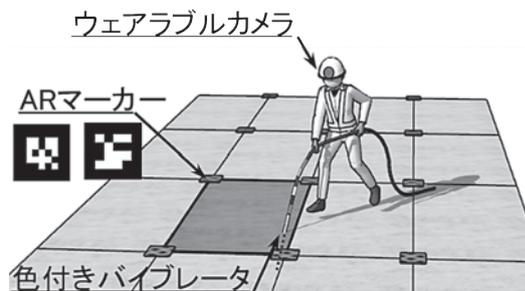


図-1 システム概要図



図-2 ウェアラブルカメラの設置状況



図-3 締固め位置解析例

図-6の網掛け部分がクラウドサーバーで構成している。スマートフォンで撮影した動画をアップロードし、サーバー1に保存されたことをトリガーに以降の自動処理が稼働する。サーバー2の解析処理サーバーを経由し、サーバー3の解析結果を格納するDBで自動処理が終了する仕組みである。クラウド化することで、解析処理サーバーのマシンスペックの強化が可能となり、処理速度が高速化する。加えて、解析結果をどこでも確認できるため、現場でも、事務所でも、遠隔地であっても確認できるメリットも存在する。

AIによる動画解析により、算定した締固め位置を可視化するシステム（図-7, 8）では、1回のバイブレーターの差込みによる締固め位置・深さを1個の球体で表現する。

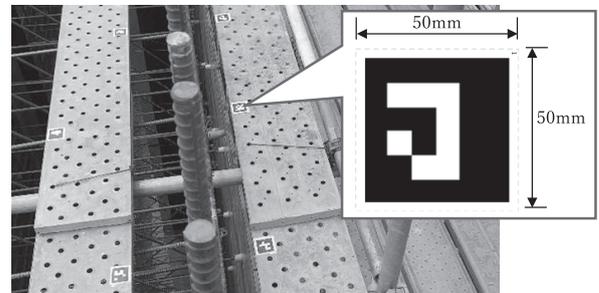


図-4 ARマーカーの配置状況

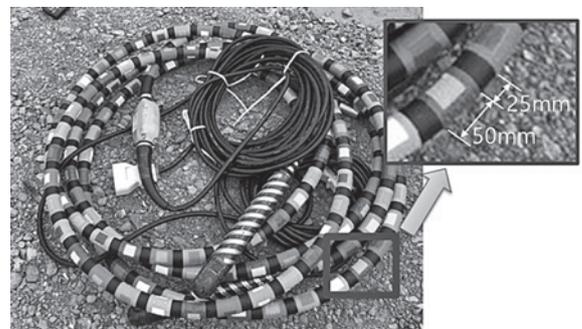


図-5 バイブレーターホースのカラーリング

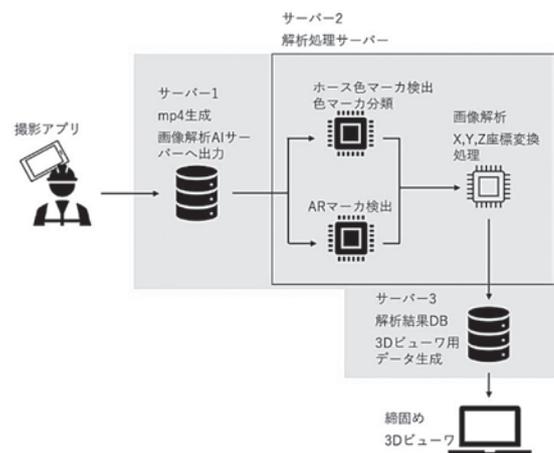
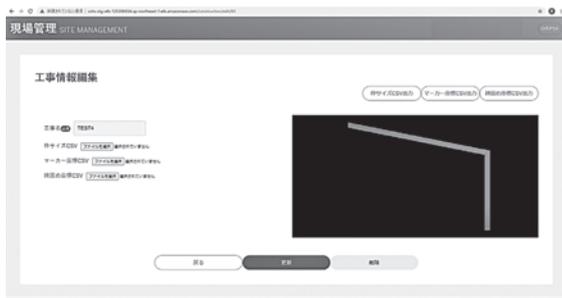
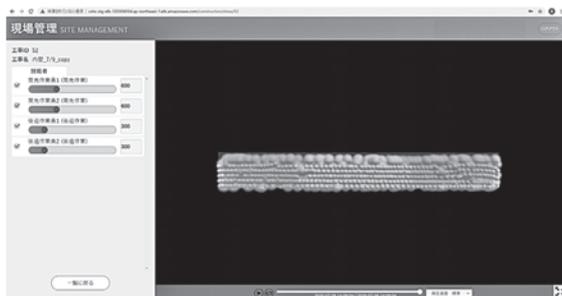


図-6 システム構成図



図一七 工事情報設定画面



図一八 締固め状況確認画面

球体の大きさが、適切に締固められた範囲と考え、具体的には、メーカー推奨値であるバイブレーター直径の約10倍に設定した⁵⁾。複数作業員の全差し込み箇所の解析ができれば、球体の塗りつぶしによって、型枠内が順次球体で埋まることとなる。他方、締固めムラがあれば球体による塗りつぶしのない空間が存在することになる。

(2) 多様な現場への適用・展開に向けて確認された課題

本システムを実際の工事現場で適用し、効果確認と課題把握を行ったが^{1), 2)}、特に今後、幅広く他の現場で展開することを考慮した際の課題を以下に記載する。

(a) ウェアラブルカメラによる撮影状況の確認

締固め位置の把握は、作業員(バイブレーターを持って操作する作業員)のヘルメットに装着したウェアラブルカメラによる動画像を基に判定するが、現地での作業にあたっては、足場付近に敷設されているARマーカーやバイブレーターホースが適切に撮影されているか、本人や管理者が容易に確認できないという課題があった。撮影されるべき被写体が適切に画角に入っていないと解析結果の精度が低下する可能性がある。

また、撮影には、専用のアプリケーションを用いるが、撮影開始時に、施工箇所IDや作業員ID、作業するバイブレーター種別、データ送信先、画素数、フレームレートなどを設定する必要があるが、作業員がこれらの設定を習熟するのが難しいという課題も存在していた。

(b) バイブレターの複雑な色付けパターン

バイブレターの差し込み深さを把握するため、バイブレーターに色付けを行っているが、当初、図一5に示した通り、ユニークにするため、複雑な色付けパターンとしていた。ただし、バイブレターの使用時間の経過とともに摩耗(劣化)し、色付けを補修しなければならないケースが発生、着色パターンが複雑な故、補修するにも容易にできないことに加え、高価になるという課題があったことから、解析精度を確保しつつ、色付けパターンを簡素化することが求められた。

(c) 解析結果を可視化する構造物が限定的

当初、本システムを適用した現場では、対象となるコンクリート構造物が擁壁(四角柱)メインということもあり、解析結果を表示する3次元モデルも構成しやすかったが、幅広い現場へ適用していく際には、四角柱以外の形状も想定される。コンクリート構造物の形状が変わると、平面位置の基準点となるARマーカーの敷設位置や空間構成も変わってくるため、それらに対応した可視化モデルが必要になる。

3. 課題への対策

前章で記述した、本システムを他の現場に適用するための課題への対策として、以下の改修・改善を行った。

(1) ウェアラブルカメラの撮影状況の確認及び操作性(ユーザビリティ)の改善

ウェアラブルカメラによる撮影状況の適切性を確認・判断するため、撮影動画像を閲覧できるWEBページを作成した(図一9)。本ページは、施工箇所や日付、作業員IDを選択すると、時刻別に動画像リストが表示され、確認したい時刻をクリックするとその動画像が再生・閲覧できる。当該動画像は、ウェアラブルカメラで撮影したデータをクラウドに送信し、AI画像処理する前のものであるため、撮影から1~2分後には閲覧することができる。更に、WEB環境で作成しているため、打設現場に持ち込んだタブレット等にて作業員別のウェアラブルカメラ動画像の閲覧が可能、作業員本人も現在の撮影状況を確認することができ、かつ画角異常が発生した場合は、カメラ角度の修正等が実施可能となる。

次に、ウェアラブルカメラの初期設定を簡易にするために、各種パラメーターの設定は、事前にクラウド上で管理者が実施、ウェアラブルカメラの撮影アプリ側では、プロジェクトIDとユーザーIDの2種の値を入力すれば良い方式とした(図一10)。クラウド側



図-9 作業員動画画像ビューワー

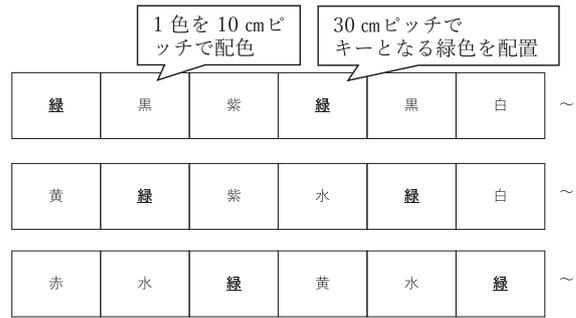


図-12 新たな色付けパターン (一部分)



図-10 ウェアラブルカメラアプリの初期設定画面



図-13 新たな色付けパターンのバイブレーター



図-11 従前の色の組み合わせパターン (一部分)

では、この2種のID組み合わせに紐づく撮影パラメーターの定義ファイルを保持しており、それを参照し、撮影アプリ側に送信することで、撮影アプリも所定の撮影・送信が可能となった。これにより、撮影開始時の撮影アプリ側の入力値が6種から2種に減少し、ユーザビリティの向上が図られた。

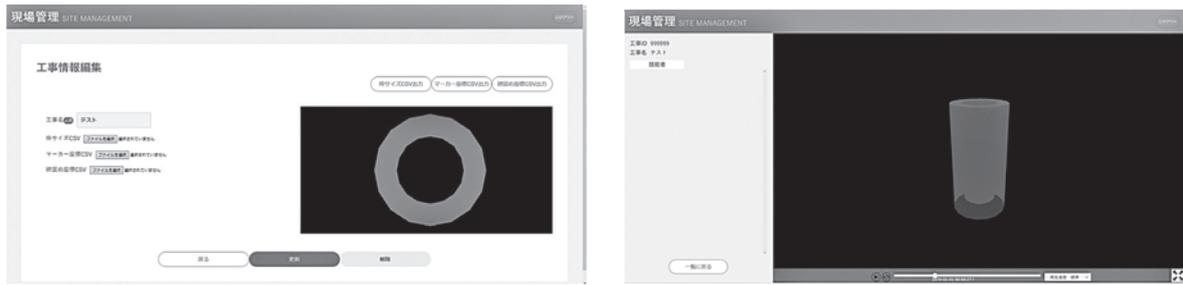
(2) バイブレーターの色付けパターンの簡素化

バイブレーターの従前の色付けパターンは、図-11に示す通り、外側・内側の2重となるマーカース間を中間色でつなぎ合わせる構成であった。新たな色付けパターンを複数検討し、さらにバイブレーターに着色可能な色の組み合わせを総合的に考慮して、図-12, 13に示す通りの色付けパターンとした。新たな色付けパターンでは、2重3重の色構成をやめ、1重の色を10cmピッチで塗っていくこととした。これにより色付け加工費が削減できる。なお、30cmピッチでキーとなる「緑色」を配置しており、人間の目で

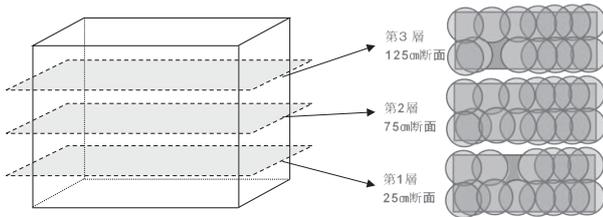
表-1 コンクリート構造物が円柱の場合の座標点入力値の例 (一部)

連番	X	Y	Z
1	1,000	500	2,000
2	962	309	2,000
3	854	146	2,000
4	691	38	2,000
5	500	0	2,000
6	309	38	2,000
7	146	146	2,000
8	38	309	2,000
9	0	500	2,000
10	38	691	2,000
⋮	⋮	⋮	⋮

も概ねの長さ(深さ)が数えられるように考慮した。この色付けパターンであれば、摩耗(劣化)により部分的に色が剥がれたり、不鮮明になった場合も、同色を上塗りすることができ、簡易補修が可能となった。色付けパターンの変更に伴い、AI処理も変更を行った。緑色と緑色の間の色マーカーの組み合わせにより、深さを特定する。各色マーカーの中心点を把握し、中心点間が10cmになることを踏まえ、その間を1cm単位で補間推計するロジックも追加した。従前のマーカーに比べ、1つのマーカーが大きく1色構成のため、AI側の誤認や判読不能が減ると期待できるが、今後、実際の現場で利用して精度を検証する予定である。



図一 14 構造物モデルの描画例 (表一 1 の座標点群を描画)



図一 15 構造物を任意の深さで断面図を生成する機能イメージ

(3) 多様な構造物に対応した解析結果の可視化

これまでの四角柱を基本に、他の形状の構造物でも対応できるように、構造物モデル構築の際に連続する座標点を取り込み、自動的に3次元モデルを生成する仕組みを導入した。例えば、構造物が円柱の場合の入力座標点を表一1に示す。このデータを読み込むと、自動で図一14に示すような構造物モデルを生成する。円柱以外の形状であっても外形座標点群のデータを作成すれば、容易に3次元モデルが生成できるようになった。

また、従来表現していなかった可視化方法として、構造物の深さ方向における任意の断面で切ったときの断面図を表示する機能も構築中である(図一15)。これにより、コンクリート打設の1層目と2層目の断面等を指定することで、断面図(平面図)上で締固め不足箇所がないかを確認することが可能となる。

4. おわりに

本稿では、コンクリート工事における締固め箇所を、人工知能モデルを活用した動画像解析により定量的に把握し、かつリアルタイムに結果をフィードバックするシステムを紹介するとともに、当該システムを汎用的に様々な工事現場で実用化するための課題を整理し、その対策として行った各種改修・改善内容を記載した。

本システムの特徴は、締固め作業の動画像から人工知能モデルを活用した解析処理により締固め位置を、早く、正確にフィードバックし、締固め不足箇所の早期発見と、再締固め等の対処が可能になることである。

今後、多様な現場への適用・展開を図っていくこと

で、本システムの有効性や効果確認のみならず、操作性や実施可能性も向上していくことを目指す。さらに、締固め不足箇所を自動で判定する機能を構築することが当面の目標である。締固め不足箇所の自動判定ができれば、再締固めを必要とする箇所のお知らせ機能や作業員を誘導する機能の構築も考えられる。その上で、経験が浅い作業員への教育・ガイダンスへの活用などが可能となる。

JCMIA

《参考文献》

- 1) 宇野昌利, 仲条仁, 今井龍一: コンクリート締固め位置のリアルタイム解析システムの開発と現場試行, 土木学会 AI・データサイエンス論文集, 第2巻 J2号, p.757-764, 2021.
- 2) 仲条仁, 宇野昌利, 山口浩: コンクリート締固め管理システムを開発 - AIを活用し締固め状況を可視化 -, (一社)日本建設機械施工協会編「建設機械施工」, Vol.74, No.2, p.27-32, 2022.
- 3) 今井龍一, 栗原哲彦, 谷口寿俊, 伊藤誠, 横田拓也: ウェアラブルカメラの動画像を用いたパイプレーターの差し込み位置の計測プログラムの開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.74, No.2, pp.L102-I_112, 2018.
- 4) 今井龍一, 栗原哲彦, 横田哲也: コンクリート打設におけるパイプレーターの差し込み深さの計測手法の開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.75, No.2, pp.L12-I_21, 2019.
- 5) エクセン(株): 建設機械総合カタログ (2019年~2020年版), p.7.

【筆者紹介】

仲条 仁 (ちゅうじょう じん)
 (株) Create-C
 代表取締役 / CEO



宇野 昌利 (うの まさとし)
 清水建設(株)
 土木技術本部イノベーション推進部
 主査



前田 真護 (まえだ しんご)
 (株) Create-C
 次世代インフラ・プロジェクトマネージャー

