

多機能センサを活用した現場打ち コンクリート工の施工・品質管理の見える化

横山 大輝¹・佐野 健彦²

¹日本国土開発株式会社 西日本土木事業部 土木部 (〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島5-5-15)

²日本国土開発株式会社 土木事業本部 技術部 (〒107-8466 東京都港区赤坂4-9-9)

本稿では、ICTの活用によるコンクリート打設時の充填状況と締固め状況および、打設後の強度発現状況の見える化を検討した現場実証実験について述べる。実験の結果、型枠に複数個の多機能センサを配置して、そこから得られる各種情報に基づいて上記各状況が把握できること、およびその状況をリアルタイムで図化するシステムの適用性を確認し、現場打ちコンクリート工の施工・品質管理の見える化実現の可能性を示した。

キーワード ICT, 現場打ちコンクリート工, 充填状況, 締固め状況, 見える化

1. はじめに

国土交通省は、ICTの活用などにより建設工事の生産性向上を目指すi-Constructionを推進している。コンクリート工事の分野では、コンクリート生産性向上検討協議会において、規格の標準化や全体最適などの新施策を導入している。このような背景の中、様々な新施策の実効性を得る観点から、現場打ちコンクリートの施工時品質を確保し、耐久性を向上する基本的な取組みの重要性が高まってきている。現場打ちコンクリート工については、現状、多くの作業は熟練作業員の手によって行われ、耐久性に係る品質確保も彼らの長い経験に基づく勘所を押えた施工によるところが大きい。しかし、少子高齢化社会を迎え、現場打ちコンクリート工を支えている熟練作業員は減少し、かつ苦渋作業ゆえにその後継者の育成・確保も困難な状況になっている。このような状況を勘案すると、現場打ちコンクリート工は早急な省人化と、熟練作業員のみならず頼らない新たな品質確保の方法を検討する必要がある。

本開発は、現場打ちコンクリートの施工時品質を確保し、耐久性を向上するための新たな施工・品質管理方法の実現を目指した。具体的には、コンクリート打設時の充填状況と締固め状況、および打設後の強度発現状況の見える化を開発目標とした。このような施工・品質管理の見える化は、現場に携わるすべての人が施工に係る課題を共有し、改善に努めるための具体的かつ視覚的な根拠となり得るため、コンクリート構造物の品質確保や耐

久性向上に大きく寄与できると考えている。

以下に、開発目標の詳細、技術の実現性を検討した室内実験の概要、および、その結果を踏まえて実施した現場実証実験について述べる。

2. 開発目標の詳細

本章では、多機能センサを活用したコンクリート打設時および打設後の施工情報の見える化について述べる。

(1) 施工情報見える化の内容と効果

現場打ちコンクリート工の施工・品質管理の見える化の内容は、後述するセンサ機能を勘案して、①コンクリート打設時の充填状況の見える化、②コンクリート充填後の締固め状況の見える化、③脱型時の強度発現状況の見える化の3項目とした。これらの効果としては、充填状況の見える化により、打込み速度や打重ね時間を遵守した施工管理を行うことができるため、ブリーディングの抑制やコールドジョイント防止が図れる点、締固め状況の見える化により、適切なバイブレーション操作を行うことができるため締固め不足が防止できる点、強度発現状況の見える化により、脱型強度不足が防止できるとともに、次の施工時の重点養生箇所などが把握できる点、打設・締固め・養生に関する改善点などについて関係者が情報を共有することができることから、施工管理者は作業員などに対してデータに裏付けられた的確な指示を行うことができる点である。

(2) 施工情報見える化の方法

施工情報の見える化は、型枠に対して複数個の多機能センサを配置し、それらから得られる数値情報をコンピュータ上でリアルタイムに図化し、視覚情報へと変換することで実現している。図-1に多機能センサの概要を示す。図-1(a)は、多機能センサの表面側であり、取得データを受信側の端末へと送信する電送装置が内蔵されている。図-1(b)に示す多機能センサの裏側には、コンクリートとの接触部としての役割を果たすセンサの受感部の突起があり、型枠の板厚と同じ高さの凸状で、設置した際に型枠面と同じ高さになるように設計されている。多機能センサは、静電容量感知センサ、コンクリート温度センサおよび重力方向を感知する加速度センサを応用した型枠姿勢感知センサの3種類の測定機能を備えたセンサであるが、これまでは、一般のRC構造物やトンネル覆工コンクリートに対して主としてコンクリート温度センサからの情報に基づいた脱型強度管理^{例えば2)}に適用した機能限定での使用にとどまっていた。本開発では、多機能センサが有するすべての機能を活用し、それらの情報をコンピュータでリアルタイムに視覚情報へと変換することによる施工情報の見える化への取組みを行った。見える化を実現するための多機能センサのそれぞれの役割については、次の3通りとした。1つ目として、コンクリートの充填状況の把握は、多機能センサ受感部がコンクリートと接触した際に電極間の静電容量が変化する特性を活用できると考え、静電容量感知センサを用いることとした。2つ目として、締固め状況の把握は、パイプレータによる締固め時の振動加速度を加速度センサで捉え、その値から締固めエネルギーを算出できると仮定し、加速度センサを活用した。3つ目として、コンクリートの強度発現状況の把握は、温度測定値に基づく積算温度法でコンクリート強度を推定し、強度発現状況を推定する方法とした。

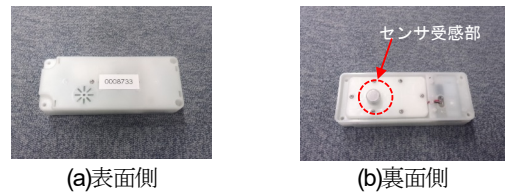


図-1 多機能センサの概要

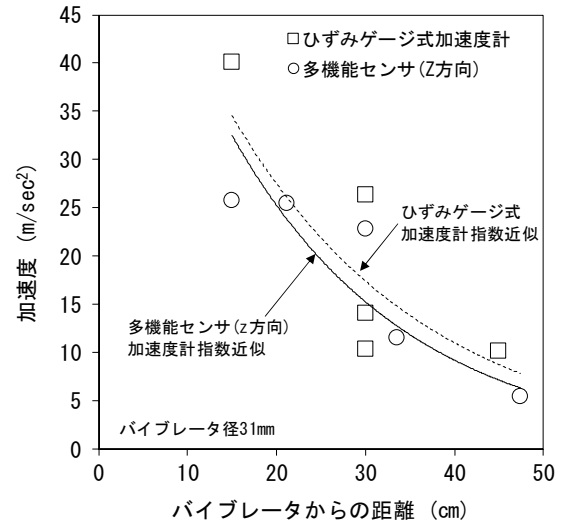


図-2 多機能センサによる加速度測定の実験結果³⁾

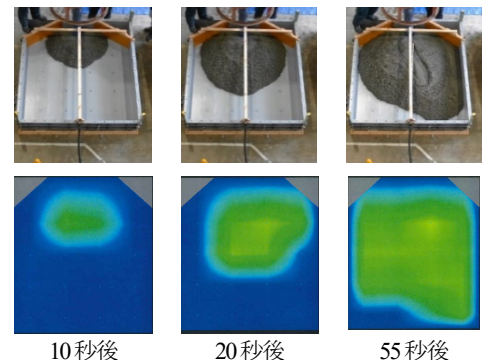


図-3 充填状況の見える化に係る室内実験結果⁴⁾

上：映像キャプチャ 下：見える化システムによる図化

3. 室内実験による技術の実現性の検討

多機能センサが有する3つの測定機能は、前章に記述した通り、基本的には、温度測定値に基づいて構造体コンクリートの強度発現を推定・管理するために活用されており、コンクリート打設時の充填状況や締固め状況の把握に活用された事例は見当たらない。そこで、多機能センサの静電容量測定値による充填状況の把握、および加速度測定値による締固め状況の把握について、技術の実現性をいくつかの室内実験で検討した。室内実験の検討内容や結果の詳細については文献^{3) 4)}に示すが、得られた主な知見は以下に示す3点である。①型枠に設置した多機能センサで、一般的な加速度計と同様、振動締固め時にコンクリートに作用する加速度が測定できる。ま

た、図-2に示す多機能センサによる加速度測定の実験結果では、Z方向加速度成分とひずみゲージ式加速度計との比較において、パイプレータからの距離が同じコンクリートに作用している加速度を安全側に評価できることが確認されている。②図-3下段に示す格子状に配置した多機能センサの充填感知情報に基づく図化の結果は、図-3上段に示すビデオキャプチャ画面と比較的によく合致していることが分かる。締固め状況についても同様な結果が得られ、これらのことから、格子状に配置した複数の多機能センサの格子点情報を処理することで、コンクリート打設時の充填状況や締固め状況を面的に把握できる可能性を見出した。③複数の多機能センサ情報をリアルタイムで処理し図化する手法である見える化システムについても確認することができた。以上の室内実験成果を踏まえ、多機能センサ機能を活用したコンクリート

打設時の施工・品質管理の見える化について、実構造物のコンクリート打設を対象に検証した。

4. 施工および品質管理の見える化

トンネル覆工コンクリート打設時の充填状況と締固め状況および、打設後のコンクリート強度発現状況の見える化を検証するためSトンネルとFトンネルの2現場および一般的なRC構造物としてL型擁壁を対象とした実証実験を行った。

(1) Sトンネルにおける充填・締固め状況および強度発現状況の見える化

トンネル覆工用のセントルは、検査窓やスキンプレートの継ぎ目、補強鋼材など1.5m程度で設置されることが多い。図-4は、Sトンネルのセントルにおける多機能センサの配置イメージを示したものである。離散情報からリアルタイムに充填状況などの視覚情報への変換を可能にするため、この図に示すように、多機能センサは1.5m程度の間隔で105個配置した。

a) 見える化の項目と方法

Sトンネルでは、充填状況、締固め状況および強度発現状況の3項目について見える化の検証を実施した。多機能センサで測定したデータは、多機能センサから無線を用いて転送され、専用のリーダを介してデータ読み取り用のコンピュータに取り込まれる。取り込まれたデータは、Wi-Fi接続により見える化ソフトを組み込んだタブレット端末に再転送され、視覚情報としてリアルタイムに変換される。覆工コンクリート打設時のセントル近傍では、図-5に示すようなデータ読み取り用コンピュータおよび見える化用のタブレット端末を用いた施工管理を行った。筆者らは、既往の研究⁵⁾を参照して、多機能センサで測定した加速度データを基に締固めエネルギーを算出し、その累積値と予め設定した目標エネルギー値を比較して締固め状況を評価する方法を採用している。Sトンネルにおける検証では、加速度に複数のしきい値を設定し、測定される加速度が設定したそれぞれのしきい値を超える時間を積算し、その積算時間に基づいて締固めエネルギーを算出した。

b) 実験結果および考察

図-6は、覆工コンクリートの充填状況の見える化結果の一例を示したものである。図中の青色表示は、コンクリート充填前の状況であり、緑色表示は充填が完了した領域を示している。現場実験時には、コンクリートの充填状況を目視やスケールで確認していたが、多機能センサ情報に基づいて見える化した施工情報は、人による確認結果とよく合致していた。このことから、多機能センサに組み込まれた静電容量感知センサの静電容量値の変

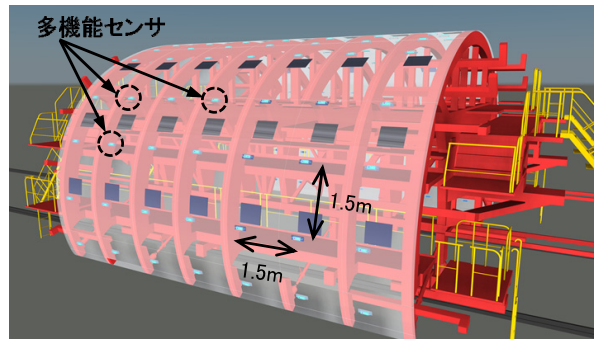


図-4 多機能センサの配置イメージ

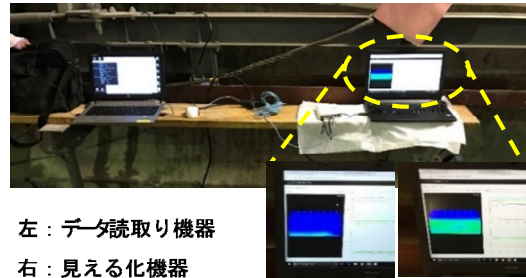


図-5 リアルタイムでの見える化状況

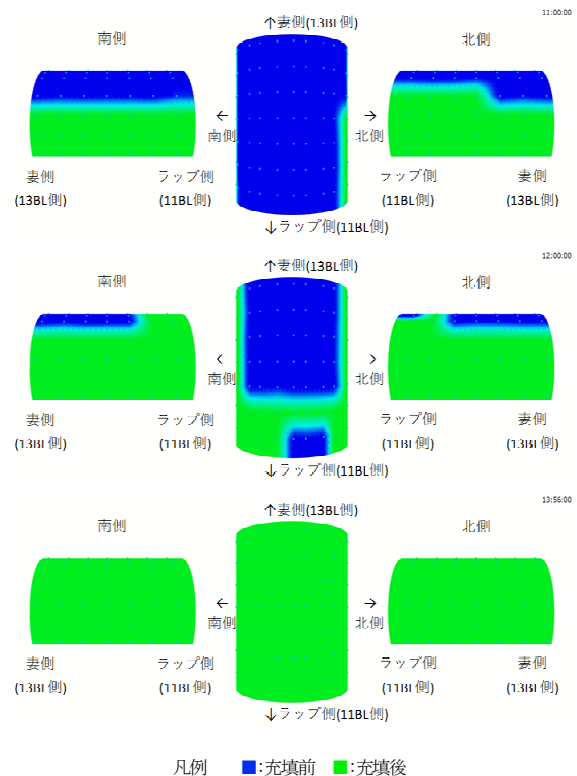
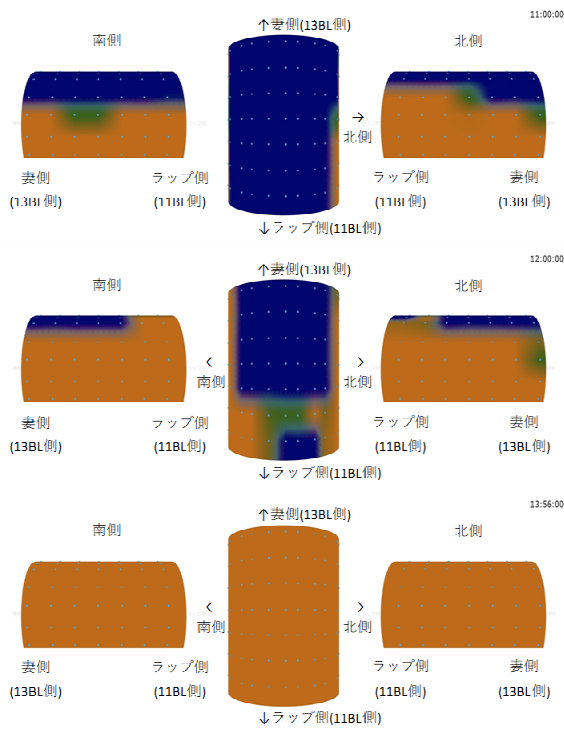
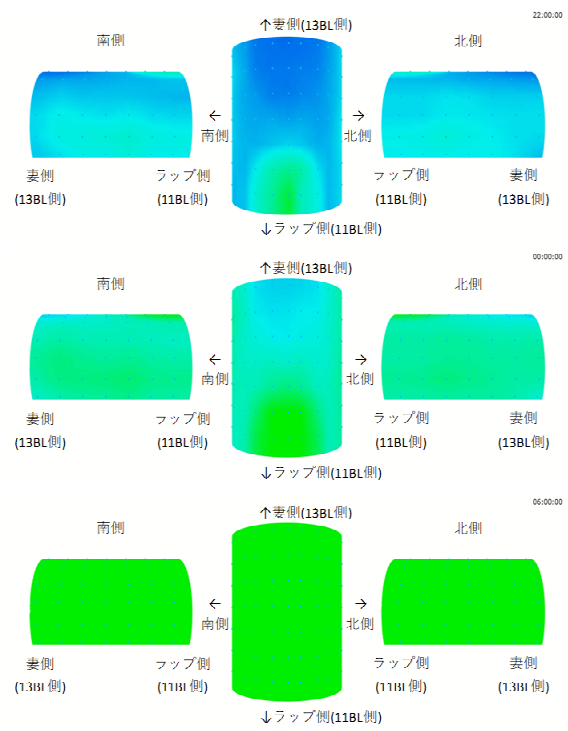


図-6 充填状況の見える化結果の一例

化でコンクリートの充填状況の見える化が可能であることが、実際の施工レベルでも確認できたといえる。図-7は、静電容量感知センサおよび加速度センサに基づく覆工コンクリートの充填と締固め状況の見える化結果の一例を示している。図中の濃青色領域は、コンクリートが充填されていない領域であり、緑色領域は、コンクリー



凡例 ■:充填前 ■:充填後 ■:縮固め完了後
 図-7 縮固め状況の見える化結果の一例



凡例 ■:強度発現前 ■:強度発現後
 図-8 強度発現状況の見える化結果の一例

トが充填された領域を示している。更に、橙色領域は、充填および所定の縮固めエネルギーを受けた領域を表している。図中の緑色で表示されているコンクリートが充填された領域が、パイプレータによる縮固めで橙色に変化する状況が可視化できており、人力による縮固め状況の見える化が実際の施工においても確認できたといえる。図-8は、温度センサの情報から計算されたコンクリートの強度発現状況を可視化した図である。図中の緑色表示された領域は、所要脱型強度以上の強度発現が生じている領域を示している。この図から、従来は多機能センサ設置箇所ごとに点情報として把握してきた強度発現状況が、覆工全面において面的かつ視覚的に把握できていることが分かる。

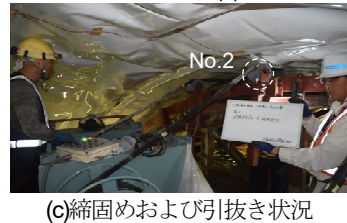
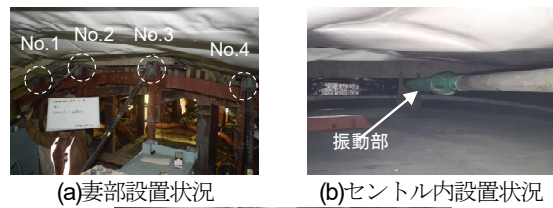


図-9 Fトンネルにおける覆工天端部の縮固め手順

(2) Fトンネルにおける天端部の縮固め状況の見える化

覆工コンクリート天端部は、十分な縮固めが困難な部位である。近年は、引抜き式の専用パイプレータで天端部を縮固める技術が開発されているが、その効果を十分に発揮するためには、縮固め有効範囲や縮固めの状態を把握する必要がある。ここでは、引抜き式パイプレータが導入されていたFトンネルを対象として、図-9に示す引抜き式パイプレータによる天端部の縮固め状況を見える化し、引抜き式パイプレータによる縮固め効果を検証した結果について述べる。

a) 多機能センサと引抜き式パイプレータ配置概要

図-10は、Fトンネルのセントルにおける多機能センサと引抜き式パイプレータの配置概要を示している。図に示すように、図中水色のドットで示す多機能センサは、アーチ部のみに配置し、その数は1断面(円周方向)あた

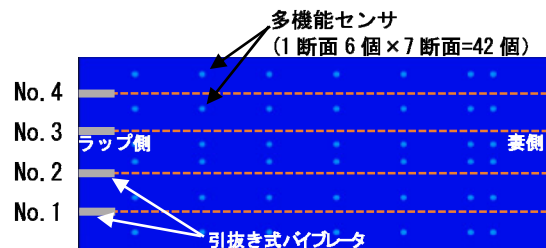


図-10 多機能センサと引抜き式パイプレータの配置概要 (セントルを上から見た図)

り6個、縦断方向で7断面の合計42個の配置とした。多機能センサの設置位置と設置数は、4本の引抜き式パイプレータ設置範囲を含む幅4m程度の天端部の縮固め状況が把握および評価ができること、また、圧力計、検測ピンや補強リブなどのセントル付帯設備の位置を勘案して決定している。

b) 見える化の手順

締固め程度を評価するエネルギーは、Sトンネルと同様の方法で算出した。そして累積締固めエネルギーが目標締固めエネルギーを満たした領域を青色から緑色への色変化で表示する方法としている。

c) 実験結果および考察

図-11は、人力による締固めが終了した時点での天端部の締固め状況を示している。上述のように、緑色部分は本検証で設定した目標締固めエネルギーを満たした領域である。この図から、一般的な施工方法である人力による締固めで、覆工天端部のほとんどの領域は目標締固めエネルギーを満たしていることが分かる。この図以外の例では、人力による締固めのみで天端部の全領域が設定した目標エネルギーを満たした施工ブロックも存在した。しかし、僅かな領域ではあるが、今回設定した目標締固めエネルギーに対して締固めが不足している状況も示されている。図-12(a)～図-12(d)は、引抜き式パイプレータの作動に伴う天端部の締固め状況の変化を示している。4本配置した引抜き式パイプレータは、最初にNo.1のパイプレータから引抜き、No.4, No.2, No.3の順序で1本ずつ引抜きながら締固めを行った。各パイプレータの引抜きおよび締固めによって、残存していた青色系領域が徐々に緑色に変化し、最終のNo.3パイプレータによる締固め後には、天端部の全領域で設定した目標締固めエネルギーを満たしたことを確認できた。以上のように、引抜き式パイプレータは、天端部の締固めに対して有効であることが、締固め状況の見える化によって確認することができたといえる。

(3) 一般RC構造物の施工状況の見える化

一般RC構造物における見える化の検証は、L型擁壁の壁部のコンクリート打設を対象に実施した。壁部型枠の一部を、多機能センサを搭載した600×1800mmの樹脂製型枠18枚で置換えて実験を行った。多機能センサは、図-13に示すように樹脂製型枠のほぼ中心部に設置されており、幅方向で1800mm、高さ方向で600mm間隔(一部400mm)の配置とした。

a) 充填状況と締固め状況の見える化

壁部のコンクリートは、1層の打込み高さを50cm程度とし、打込み後速やかに棒状パイプレータで締固めを行った。このような施工状況を見える化した結果を図-14(a)および図-14(b)に示す。この図から、樹脂製型枠配置範囲にコンクリートが充填されていく状況および、充填後のパイプレータ操作で当該箇所のコンクリートが締固められていく状況を視覚的に把握できることが分かる。

b) 締固めエネルギーと表層品質の関係

図-15は、コンクリート表層品質との関係を明らかにするため累積締固めエネルギーと透気性および吸水性に着目した図である。この図から、ばらつきは存在するが、両者にはある程度の相関がみられ、締固めエネルギーが

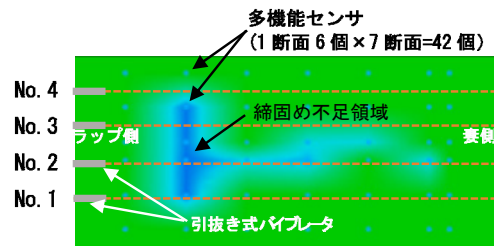
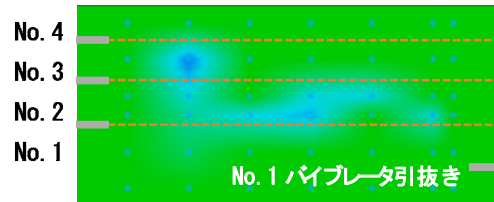
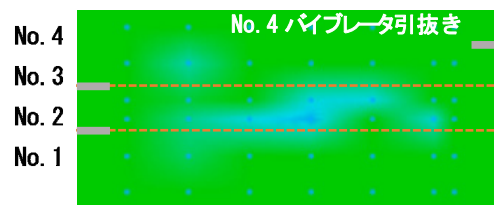


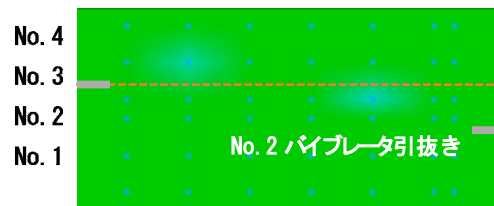
図-11 人力による締固め終了時の状況



(a) No.1パイプレータ引抜き後(天端部の締固め開始時)



(b) No.4パイプレータ引抜き後



(c) No.2パイプレータ引抜き後



(d) No.3パイプレータ引抜き後(天端部の締固め完了時)

図-12 引抜き式パイプレータを用いた締固めにより天端部の締固め不足が防止される状況

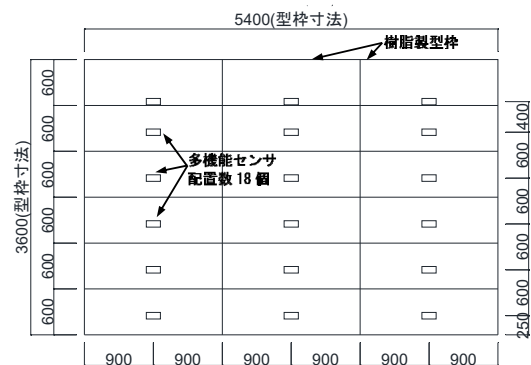


図-13 樹脂製型枠と多機能センサの配置状況

大きい箇所は、透気係数が小さく(空気を通しにくく)、また吸水速度も小さい(水が浸透しにくい)傾向にあるこ

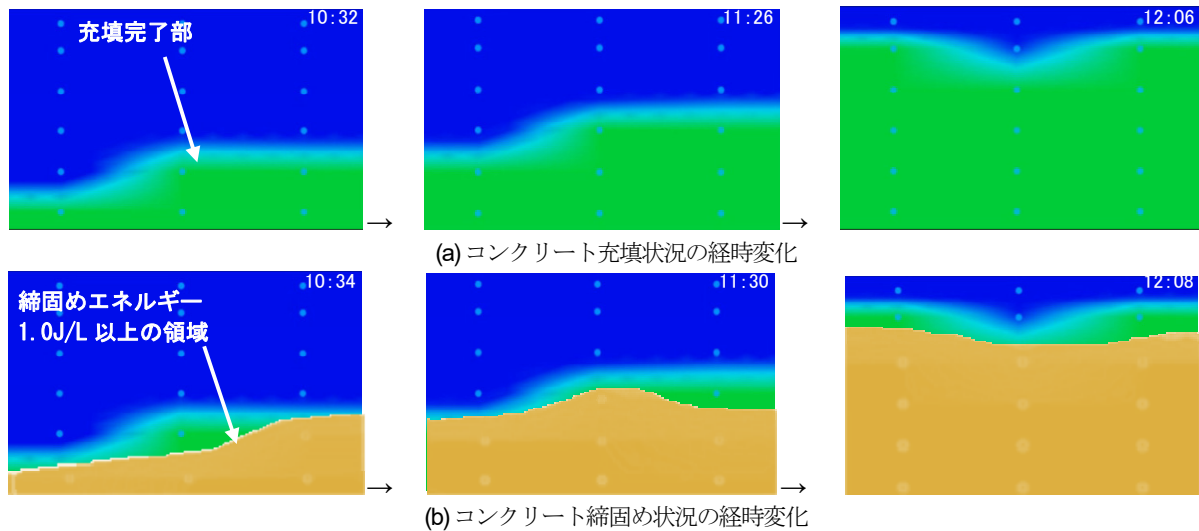


図-14 樹脂製型枠配置範囲におけるコンクリートの充填状況と締固め状況

とが分かる。これは、コンクリート打設時に締固め状況を把握することで、硬化後のコンクリートの表層品質が推定できる可能性を示唆しているといえる。

5. おわりに

本稿では、品質管理の高度化を目的として、トンネル覆工セントルおよびRC構造物の型枠に設置した多機能センサからの情報に基づくリアルタイム見える化を行った。今回の検討範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 現行の覆工コンクリートの品質管理項目には、締固めエネルギーに基づく締固め管理は含まれていない。締固めエネルギーとコンクリート品質の関係や締固め程度を評価するエネルギー値などの整備が必要であるが、多機能センサによる見える化は、締固め状況を把握するための有効な管理手法として展開できる可能性がある。
- 2) 高密度に配置した多機能センサ情報に基づく覆工コンクリートの脱型強度管理は、各格子点の情報を補完することで強度発現状況をリアルタイムに把握できることを確認した。従来は点情報として評価してきた強度発現状況を、覆工全体の面情報として見える化できることを示した。

今後は、コンクリート構造物の施工・品質管理の自動化におけるモニタリング技術としての発展を考えたい。

謝辞

本稿は、日本国土開発(株)、児玉(株)および(株)科学情報システムズの3社共同研究成果を述べたものである。Sトンネルに関する記述は、国土交通省「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」の試行成果の一部を述べたものである。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表す。

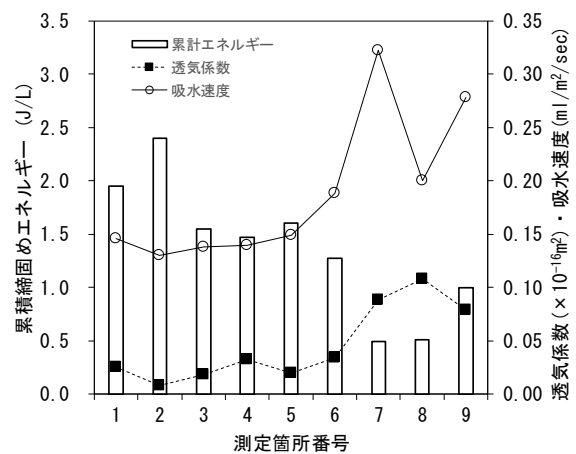


図-15 締固めエネルギーと表層品質の関係の一例

参考文献

- 1) 野口貴文, 北垣亮馬, 西島茂行, “スマートセンサ型枠を用いた橋脚コンクリート工事・品質管理システム” 建設機械施工, 65(8), pp.58-61, (2013)
- 2) 野口貴文, 西島茂行, 甲田展丈, 原雅秀, 山本秀之, “スマートセンサ型枠システムのスライドセントルへの適用(その1)”, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, VI部門, pp.669-670, (2013)
- 3) 山内匡, 千賀年浩, 野口貴文, 北垣亮馬, 西島茂行, 山本秀之, “型枠に設置したセンサによるコンクリート締固め時の加速度測定に関する実験”, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, VI部門, pp.1543-1544, (2017)
- 4) 佐原晴也, 千賀年浩, 山本秀之, 津久井寛, 武田祐二, 小笠原一基, “型枠に設置したセンサによる覆工コンクリートの充填状況および締固め状況の把握に関する実験”, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, VI部門, pp.307-308, (2017)
- 5) 梁俊, 丸屋剛, 坂本淳, 宇治公隆, “締固め完了エネルギーによる同一スランブコンクリートの施工性評価”, コンクリート工学年次論文集, 31(1), pp.1393-1397, (2009)