

ICT を活用したコンクリートの施工・品質管理の見える化

横山 大輝¹

¹日本国土開発（株） 土木事業本部

本報では、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（トンネル覆工 2 現場と一般の RC 構造物 1 現場）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（スマートセンサ）を配置して、それで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, スマートセンサ

1. はじめに

国土交通省は、ICT の活用等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、省内に設置された「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が検討されている。既に、スランプ規定の見直しなど実工事に反映された施策もあり、近々、生産性向上に向け更なる新施策が提示・実施されて行くと考えられる。

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も、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たと考えられる。

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・確保も難しくなることが予測される。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、熟練作業員のみには頼らない新たな品質確保の方法を検討する必要があると考えられる。

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・品質管理方法の開発を目指したものである。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」を開発目標としたものである。このような施工・品質管理の見える化は、現場に携わる全ての方が施工に係る課題を共有し、改善に努めるための具体的・視覚的な根拠になり得るため、コンクリート構造物の品質確保や耐久性向上に大いに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

(1) 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以下の 3 点とした。

- ①コンクリート打設時の「流動・充填状況の見える化」
- ②コンクリート充填後の「振動締固め状況の見える化」
- ③養生打切り・脱型時の「強度発現状況の見える化」

上記 3 点の見える化の効果として、以下が期待できると考えている。

- ①流動・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。

- ② 振動締固め状況の見える化により、適切なバイブレータ操作を行うことができるため、締固め不足が防止でき、また、次の施工時の締固め注意箇所などが把握できる。
- ③ 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、強度発現が遅い部位を視覚的に確認することで次の施工時の重点養生箇所などが把握できる。
- ④ 打設・締固め・養生に関する改善点等について関係者が情報を共有することができ、また、施工管理者は作業員等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。

(2) 見える化の方法

見える化の方法は、型枠に複数個の「スマートセンサ」¹⁾を配置し、それで得られる情報に基づいて行うこととした。スマートセンサは、静電容量感知センサ、型枠姿勢感知センサ（重力方向を感知する加速度センサ）およびコンクリート温度センサを備えた多機能センサであり、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の脱型強度管理^{例え2)}で使用されている。

本開発では、スマートセンサの上記3つの測定機能を活用することで、前述の3つの「見える化」が達成できると考えた。すなわち、

- ① コンクリートの接触により電極間の静電容量が変化するため、それを静電容量感知センサで捉え、コンクリートの流動・充填状況を把握する。
- ② バイブ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して締固めの程度を評価する。
- ③ コンクリート温度測定値に基づいて積算温度法でコンクリート強度を推定し、養生打切り時や脱型時の強度管理を行う。

図-1に、スマートセンサの概要、および一例

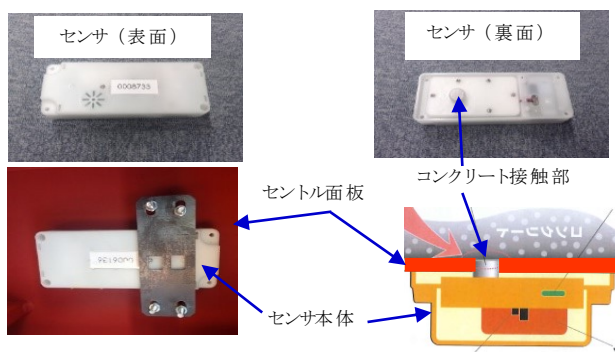


図-1 スマートセンサの概要とセンターへ設置イメージ

としてトンネル覆工コンクリート用センターへの設置イメージを示す。

3. 室内実験による技術の実現性の検討

スマートセンサが有する3つの測定機能は、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流動・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、スマートセンサの静電容量測定値による流動・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のとおりである。

- ① 型枠に設置したスマートセンサで、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、そのZ方向加速度成分で、バイブ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（図-2）。
- ② 格子状に配置したスマートセンサの充填感知情報に基づく図化（見える化）の結果は、ビデオキャプチャ画面と比較的によく合致した（図-3）。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スマート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 複数のスマートセンサ情報をリアルタイムで処理し図化する手法（見える化システム）についても確認することができた。

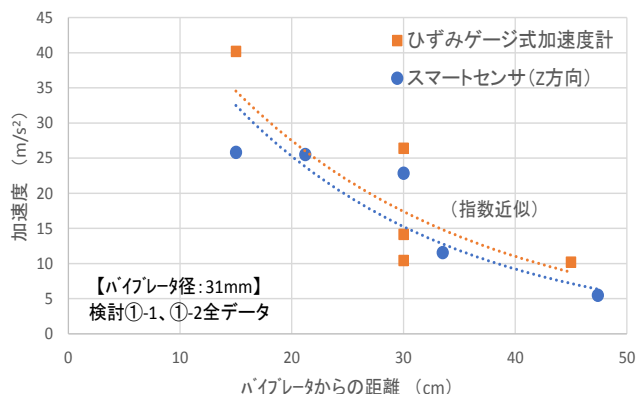


図-2 スマートセンサによる加速度測定に係る室内実験結果³⁾

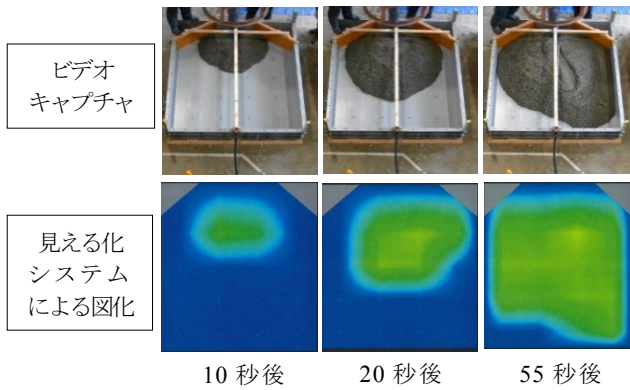


図-3 流動・充填状況の見える化に係る室内実験結果⁴⁾

以上の室内実験成果を踏まえ、スマート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. トンネル覆工コンクリートの施工・品質管理の見える化

ここでは、KトンネルとFトンネルの覆工コンクリートの施工において見える化を検証した結果を述べる。

(1) Kトンネルにおける流動・充填状況と強度発現状況の見える化

a) スマートセンサの配置状況

図-4 および写真-1 に、Kトンネルのセントルにおけるスマートセンサの配置状況を示す。同図に示すように、スマートセンサ数は81個とし、アーチ部により多く配置する計画とした。

b) 見える化項目と見える化の方法

Kトンネルでは、主に、①静電容量値の変化に基づく流動・充填状況、②積算温度法による強度発現状況の2つの項目について見える化を検討した。スマートセンサで測定したデータは無線で専用のリーダーに読み込み、それを見える化ソフトを組み込んだタブレット端末に転送し、

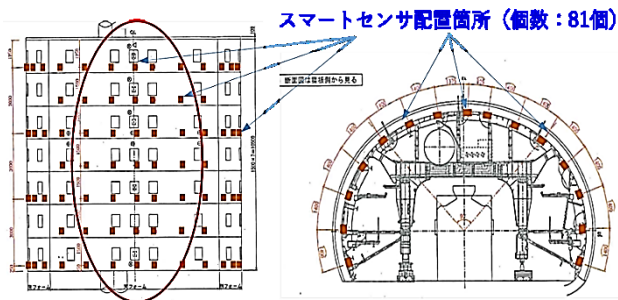


図-4 Kトンネルにおけるスマートセンサ配置概要

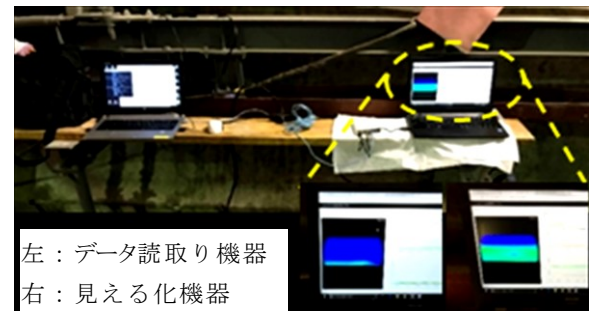


写真-2 リアルタイムでの見える化状況

セントル近傍でリアルタイムの見える化を図った(写真-2参照)。

c) 実験結果および考察

図-5 に、覆工コンクリートの流動・充填状況の見える化結果の一例を示す(緑色: 充填完了部)。

現場実験時にはコンクリートの流動・充填状況を目視やスケールで確認したが、スマートセンサ情報に基づく見える化は、人による確認結果とよく合致していた。このことから、スマートセンサの静電容量値の変化でコンクリートの流動・充填状況の見える化が図れることを、実施工レベルでも確認できたと考えている。

図-6 には、覆工コンクリートの強度発現状況の見える化結果の一例を示す(緑色: 所要脱型強度以上)。

本実証実験時期は冬季であり、打設終了後はSL付近の高さでダクト付きジェットヒータを稼働して給温養生を行った。図-6 から、給温養生により強度発現が促進される状況、養生温度が低くなりがち側壁下部や、養生時間が短い天端部側の強度発現が遅い状況など、実施工で定性的に予測される状況が具体的に、視覚的に確認できることが分かる。

以上、流動・充填状況と強度発現状況の見える化について実トンネル工事の覆工コンクリートの施工を対象に実証することができた。



写真-1 スマートセンサ近景

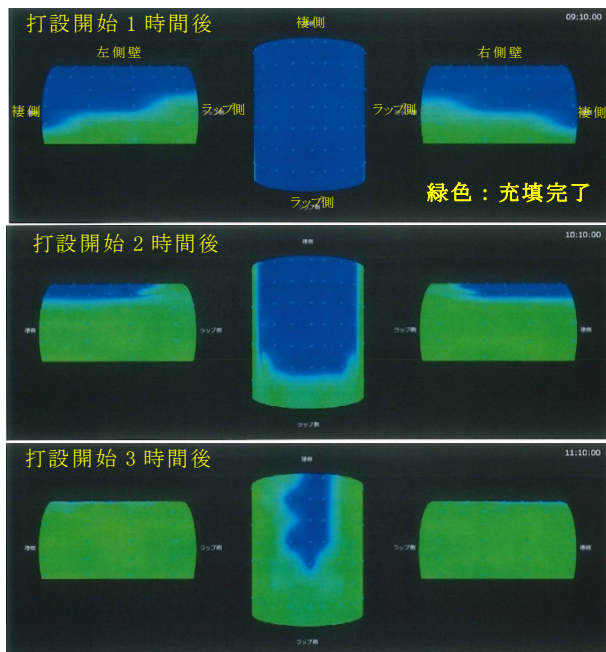


図-5 流動・充填状況の見える化結果の一例

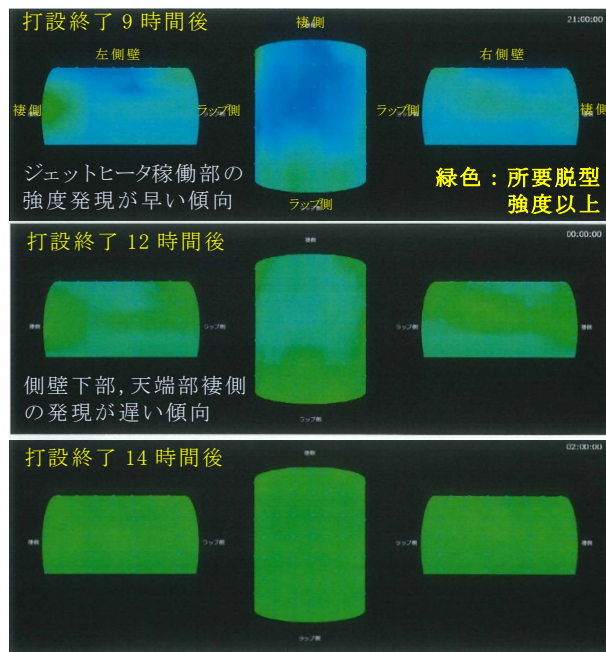


図-6 強度発現状況の見える化結果の一例

(2) Fトンネルにおける天端部の締固め状況の見える化

一般に、覆工コンクリート天端部は十分な締固めが困難な部位である。近年では、引抜き式の専用バイブレータで天端部を締固める技術が開発されている⁵⁾が、その効果を十分に発揮するためには締固め有効範囲や締固め程度を把握する必要があると考えられる。

ここでは、引抜き式バイブレータが導入されていたFトンネルにおいて、天端部の締固め状況(写真-3参照)を見える化し、引抜き式バイブレータによる締固め効果を検証した結果を述べる。

a) スマートセンサと引抜き式バイブレータの配置概要

図-7に、Fトンネルのセンターにおけるスマートセンサと引抜き式バイブレータの配置概要を示す。

同図のように、スマートセンサはアーチ部にみに配置し、その数は1断面(円周方向)あたり6個、縦断方向で7断面、合計42個とした。スマートセンサの配置と数は、4本の引抜き式バイブ

レータ設置範囲を含む幅4m程度の天端部の締固め状況が把握・評価できること、およびセンター付帯設備(圧力計、検測ピン、補強リブなど)の位置を勘案して決定した。

b) 見える化の手順

筆者らは、スマートセンサで測定した加速度測定値を基に締固めエネルギー⁶⁾を算出し、累積締固めエネルギーと予め設定した基準締固めエネルギーを比較して、締固め状況を評価・把握する方法を採っている。F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

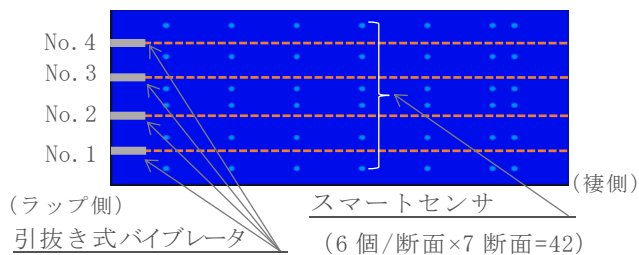


図-7 スマートセンサと引抜き式バイブレータの配置概要(センターを上から見た図)



人力による締固め



引抜き式バイブレータ4本による締固め

写真-3 Fトンネルにおける覆工天端部の締固め手順

る積算時間に基づいて締固めエネルギーを算出した。そして累積締固めエネルギーが基準締固めエネルギーを満たした領域を色変化（青→緑）で表示して見える化を図った。

c) 実験結果および考察

図-8 に、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す。上述のように、緑色部分は本検証で設定した基準締固めエネルギーを満たした領域である。同図から、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基準締固めエネルギーを満たしていることが分かる（実際、人力による締固めのみで天端部の全領域が設定した基準エネルギーを満たしたブロックもあった）。しかし、僅かな領域ではあるが、今回設定した基準締固めエネルギーに対して締固めが不足している状況（青色系領域の残存）も示されている。

図-9 には、引抜き式バイブレータの作動に伴う天端部の締固め状況の変化を示す。4本配置した引抜き式バイブレータは、No.1→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が、各バイブレータの引抜き・締固めにより、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バイブレータによる締固め後には、天端部の全領域で設定した基準締固めエネルギーを満たしたことが分かる。

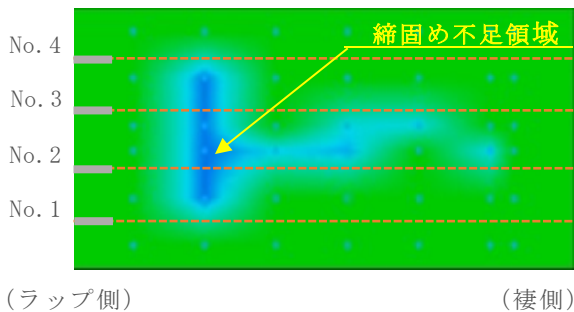


図-8 人力による締固め終了時の状況

以上のように、引抜き式バイブレータは天端部の締固めに有効であることを、締固め状況の見える化によって確認することができた。

5. 一般 RC 建造物の施工状況の見える化

ここでは、一般の RC 建造物を対象に、充填状況と締固め状況の見える化を検証した結果を述べる。

(1)対象建造物とスマートセンサ配置概要

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、スマートセンサを搭載した600×1800mmの樹脂製型枠18枚で置換えて実験を行った。スマートセンサは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）の配置となった。図-10にスマートセンサの配置概要を示す。

(2)実験結果および考察

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バイブ

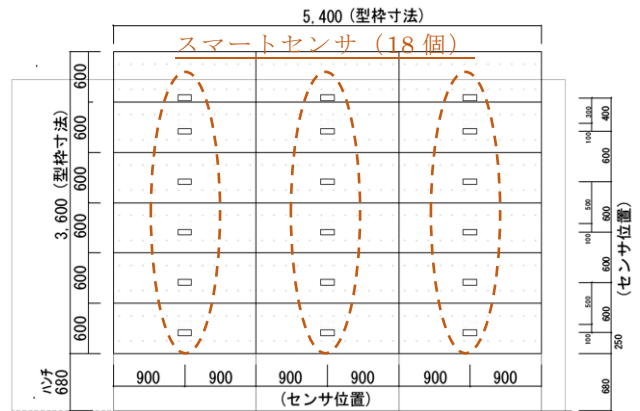
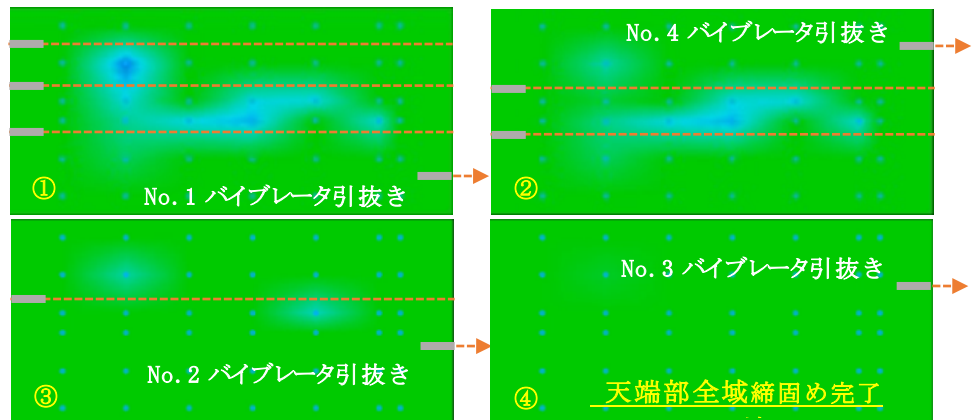
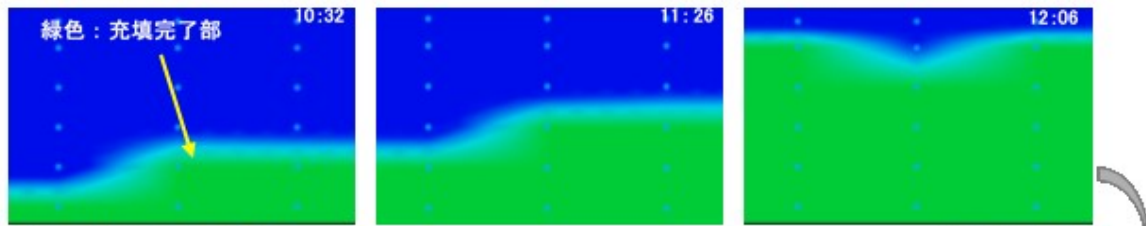


図-10 樹脂製型枠とスマートセンサの配置状況

図-9 引抜き式バイブ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



【打設状況の見える化】



【締固め状況の見える化】

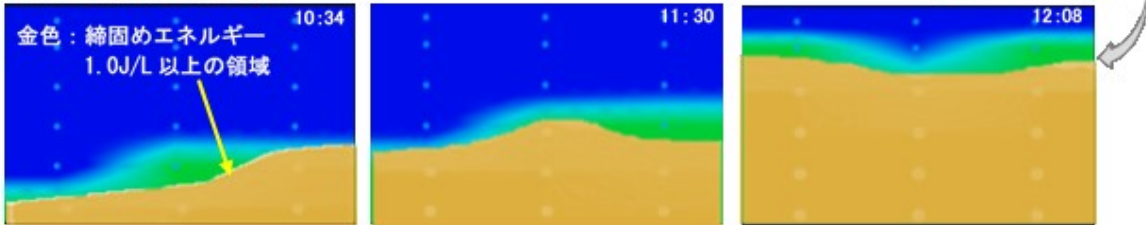


図-11 樹脂製型枠配置範囲におけるコンクリートの充填状況と締固め状況

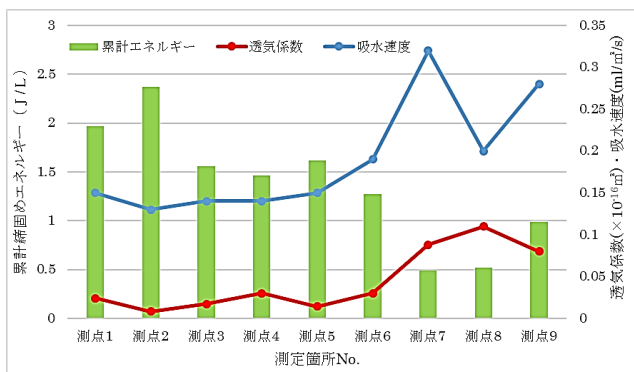


図-12 締固めエネルギーと表層品質の関係の一例

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-11に示す。同図から、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、および充填後のバイブ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-12に、締固めエネルギーとコンクリートの表層品質（透気性と吸水性）の関係の一例を示す。同図から、ばらつきはあるものの、両者にはある程度の相関がみられ、締固めエネルギーが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考えられる。

6. おわりに

本報で述べた現場実証実験の結果、コンクリートの施工・品質管理の「見える化」と、それに

よる施工時品質の確保、耐久性向上の可能性を示すことができたと考えている。今後は施工実績を蓄積するとともに、それらを通じて課題の抽出と技術改良に努め、品質確保・向上技術として活用していきたいと考えている。

また、今後の建設技術者、熟練技術者の減少を考慮すると、現場打ちコンクリート工は早急に自動化・ロボット化の検討が必要と考えられる。本報で実証した見える化技術は、将来的にはコンクリート構造物の施工・品質管理の自動化等における「モニタリング技術」としての活用が期待できると考えている。

謝辞：本報は、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。ここに記して関係者の皆様に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) NETIS 新技術情報提供システム：NO=QS-110040
- 2) 野口ほか：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，VI部門，pp669-670，2013
- 3) 山内ほか：型枠に設置したセンサによるコンクリート締固め時の振動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，VI部門，pp1543-1544，2017
- 4) 佐原ほか：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，VI部門，pp307-308，2017
- 5) NETIS 新技術情報提供システム：NO=TS-03000
- 6) 梁ほか：締固め完了エネルギーによる同一スランプ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，Vol. 31, No. 1, pp1393-1397, 2009