

# 報告 加速度センサによるコンクリート振動締固め状況の把握・管理

山内 匡\*1・野口 貴文\*2・山本 秀之\*3・友寄 篤\*4

**要旨:** コンクリートの強度発現を管理するシステムとして開発された各種センサ付き小型集積回路には、型枠取外し時期の管理を目的に加速度センサが配置されている。パイブレータによるコンクリート締固め時の振動加速度値をこの加速度センサによって捉え、この値から締固め状況の把握・管理することを目的に、室内実験および実構造物によって検討を行った。その結果、スマートセンサで捉えた加速度の値には妥当性があり、コンクリート強度や表層品質との関係から締固め度合いを評価し、締固め完了エネルギーを設定することによって、スマートセンサ位置近傍のコンクリートの締固め状況を把握・管理できる可能性を見いだした。

**キーワード:** スマートセンサ, 加速度計, 締固め状況, 品質管理, 見える化

## 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と考えられる。

本検討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。

コンクリートの脱型強度不足の防止などが期待できる強度発現状況の管理については、コンクリート型枠に搭載された各種センサ付き小型集積回路（以下、スマートセンサと称す）の温度センサによって、コンクリート温度を測定し、構造物コンクリートの強度発現を推定・

管理するシステムが開発されている<sup>1)</sup>。他方、本スマートセンサは、温度センサの他に、型枠取外し時期の管理を目的に加速度センサを有している。パイブレータによる締固め時の振動加速度値を加速度センサで捉え、この値からコンクリート締固めエネルギーが算出できれば、締固め状況の把握・管理を行える可能性がある。

以下に、スマートセンサでコンクリート締固め時の振動加速度を測定し、測定値の妥当性や実施工への実用性、また締固め度合いの評価方法について、室内実験及び実構造物により試行的に検討した結果を述べる。

## 2. スマートセンサの概要

スマートセンサの搭載断面図を図-1に示す。コンクリート型枠に搭載された複数個のスマートセンサから、各種センサによる情報を専用のリーダーによって無線で収集を行うものである。コンクリート表面に接触する温度センサによる温度履歴から、コンクリート強度をリアルタイムに推定管理するシステムは、これまでに一般のRC構造物やトンネル覆工コンクリートの脱型強度管理<sup>2),3)</sup>で使用されている。

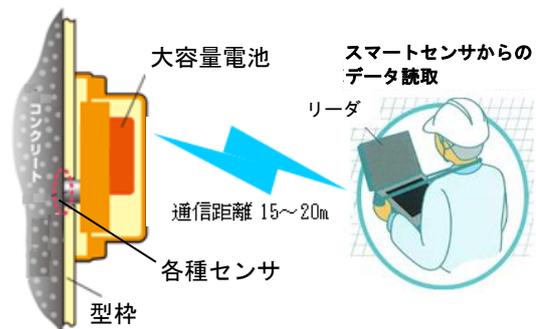


図-1 スマートセンサの搭載断面図

\*1 日本国土開発（株） 土木事業本部 工博（正会員）

\*2 東京大学大学院工学系研究科 工博（フェロー会員）

\*3 児玉（株） エンジニアリング事業部（正会員）

\*4 東京大学大学院工学系研究科 工修（正会員）

### 3. 室内実験

#### 3. 1 スマートセンサで測定した振動加速度値の妥当性

##### (1) 実験概要

鋼製型枠面板（厚さ 6mm）に搭載したスマートセンサと、一般的なひずみゲージ式加速度計によって、コンクリート締固め時に測定したそれぞれの振動加速度値を比較し、スマートセンサで測定した振動加速度値の妥当性を検討した。試験体型枠の形状寸法や棒状バイブレータ挿入位置、また各センサの設置位置を図-2 に示す。試験体型枠にコンクリートを充填後、図に示した位置に棒径 31mm の高周波バイブレータを型枠底面から 5mm の位置まで挿入し、20 秒間締固めを施し検討を行った。

##### (2) 実験結果

棒状バイブレータからの距離と振動加速度の関係を図-3 に示す。スマートセンサでは 3 方向の加速度が測定できるが、Z 方向（打設面に対して垂直方向）の加速度が卓越していたため、本報では Z 方向の加速度のみに着目して結果を整理した。また、スマートセンサ、ひずみゲージ式加速度計ともに振動加速度は測定した振動波形の振幅のピーク値の平均とした。

バイブレータからの距離とスマートセンサで測定した振動加速度の関係は、ひずみゲージ式加速度計で測定した加速度との関係と同レベルであり、距離減衰も同様な傾向を示している。このことから、スマートセンサによる加速度測定値は、一般的な加速度計による測定値と同等と評価して良いと考えられる。また、距離減衰はスマートセンサの方がやや大きい傾向にあることから、スマートセンサは棒状バイブレータからの距離が同じコンクリート中に作用している加速度を安全側に評価できるものと考えられる。

#### 3. 2 スマートセンサの実用性

##### (1) 実験概要

1層あたり厚さ 300mm 程度で打ち込んだコンクリートをバイブレータの挿入間隔 300mm 程度で順次締固める実施工状況を模しすることにより、鋼製型枠面板（厚さ 6mm）に搭載したスマートセンサの実用性を検討した。試験体型枠の形状寸法や棒状バイブレータ挿入位置、スマートセンサの設置位置を図-4 に示す。試験体型枠にコンクリート充填後、バイブレータを移動（位置 No. ① → ⑨）しながら、3.1 と同様の締固めを順次施し検討を

行った。

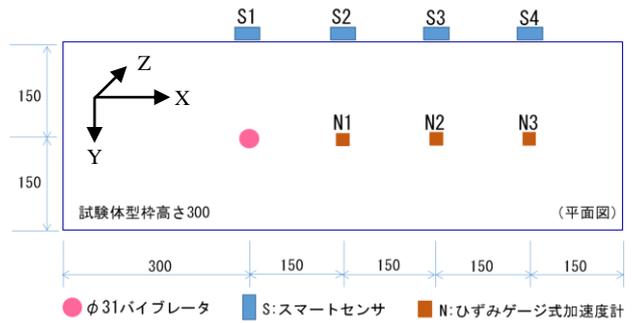


図-2 試験体型枠①

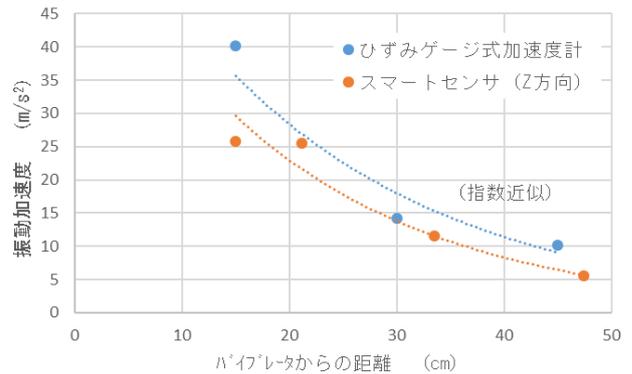


図-3 バイブレータからの距離と振動加速度の関係

##### (2) 実験結果

棒状バイブレータを順次移動して締固めた際の、位置 No. と各スマートセンサによる加速度測定値の変化を図-5 に示す。同図中、例えばセンサ 2 は、距離が離れた位置 No.1~4 や No.7~9 で棒状バイブレータを作用している時には測定加速度値は小さいが、距離が近い位置 No.5, 6 で作用している時には顕著に大きな値を示している。他のセンサによる測定値も同様な挙動を示している。これは振動加速度の距離減衰を考えると、当然に予測された結果であるが、スマートセンサによって、棒状バイブレータを順次移動させながら締固める実施工時の締固め状況を把握できることを示していると言える。

図-6 には、各スマートセンサの締固め時間と、式(1)<sup>4)</sup>より算出した締固めエネルギーの累積値との関係を示す。締固めエネルギーがあらかじめ定めた締固め完了に必要な値を超えたことを設定することで、各スマートセンサ位置近傍のコンクリートの締固めが完了したと把握・管

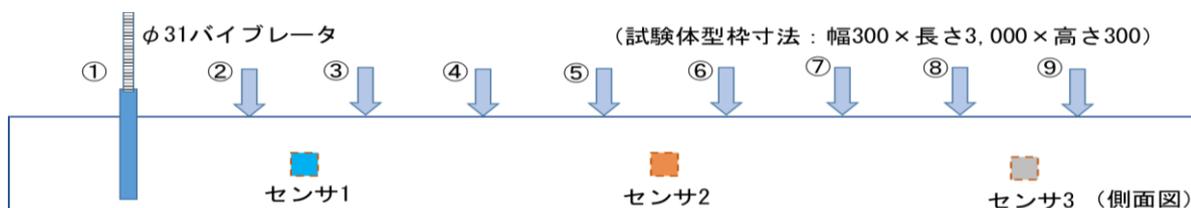


図-4 試験体型枠②

理できると考えられる。

$$E_t = \rho \times \alpha^2 \times t / 4\pi^2 \times f \quad (1)$$

ここに、 $E_t$  : t秒間の振動締固めエネルギー(J/L)

$\rho$  : コンクリートの単位容積質量(kg/L)

$\alpha$  : t秒間の平均振動加速度(m/s<sup>2</sup>)

t : 振動時間(s)

f : バイブレータの振動数(s<sup>-1</sup>)

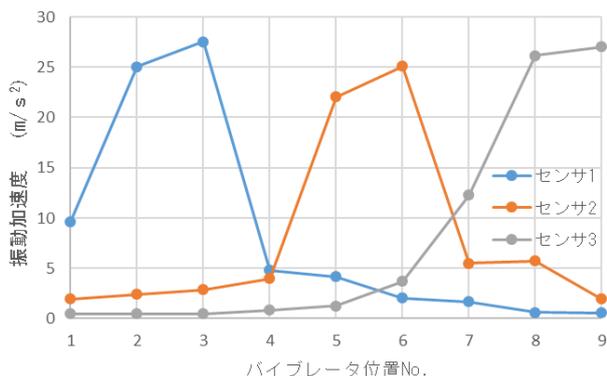


図-5 締固め位置と各センサの振動加速度の変化

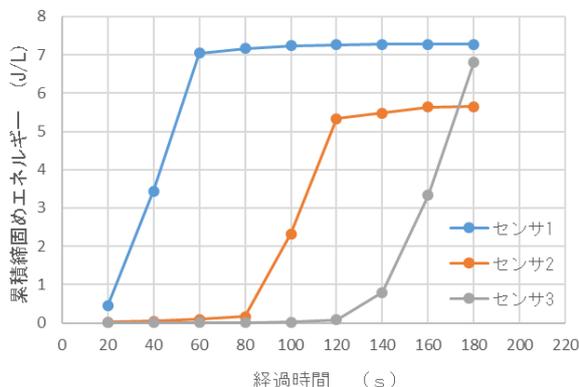


図-6 累積締固めエネルギーの経時変化

### 3. 3 スマートセンサによる締固め状況の把握

バイブレータによる締固め時の振動加速度値を加速度センサで捉え、この値からコンクリート締固めエネルギーが算出できれば、締固め状況の把握・管理を行える可能性がある。特に、トンネル覆工コンクリートアーチ部は、吹上げ方式で打ち込まれるため充填状況が把握しにくく、また十分な締固めが困難な部位でもある。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が、その使用効果を十分に発揮するためには締固め状況を把握・管理することが必要と考えられる。

#### (1) 実験概要

覆工アーチ部のセントルを模擬した試験体型枠の概

要を写真-1に示す。型枠の形状寸法は、幅 180cm×長さ 210cm×高さ 30cm であり、メタルフォームで組み立てた。また、型枠中央部の底面から 15cm の高さに棒径 43mm の高周波バイブレータを水平に設置し、引抜き式バイブレータを模擬した。型枠底面にはスマートセンサを 40cm 間隔で格子状に 16 個搭載し、格子点情報に基づいて面的にコンクリートの締固め状況の把握を試みた。

コンクリートは型枠上方から投入し、下方に向かって充填していく状況をスマートセンサで捉え、リアルタイムに図化した。次に、コンクリートを 30cm の厚さになるまで充填し、その後バイブレータを引抜きながら締固めを行い(写真-2)、締固め状況を上記同様に図化した。なお、バイブレータの引抜き速度は 90cm/分とした。

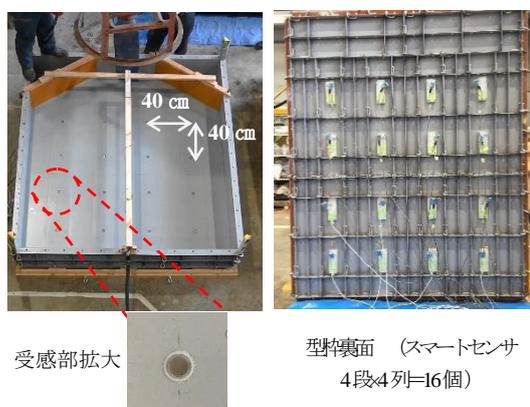


写真-1 模擬試験体型枠の概要



写真-2 実験状況

#### (2) 実験結果

バイブレータの引抜きに伴う締固め度分布の経時変化を図-7に示す。締固め度は、あらかじめ定めた締固め完了エネルギーに対する各領域の累積締固めエネルギーの比率(%)で定義し、図-7には、締固め完了エネルギーを 0.5J/L と定めて図化した一例を示す。バイブレータ振動部の位置と大きな締固めエネルギー領域は比較的によく合致しており、ほぼ妥当と考えられる締固め度分布が得られた。セントルアーチ部にスマートセンサを配置することで、天端引抜き式バイブレータによる締固め状況を把握・管理できる可能性が見いだされた。

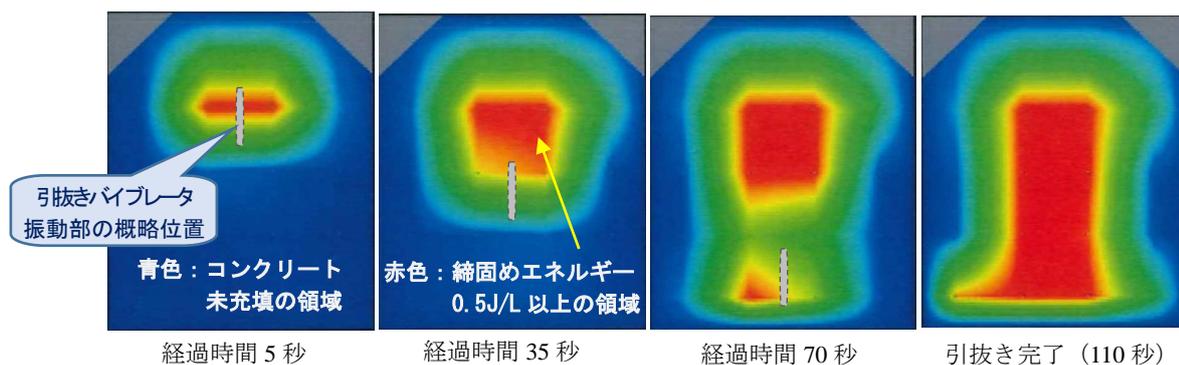


図-7 締固め度分布の経時変化

### 3. 4 締固め度合いの評価方法

#### (1) 実験概要

3.3 の試験体について、コンクリート硬化後に引抜きバイブレータから 20, 60cm の位置でコアを採取し、締固めエネルギーと強度の関係を検討した。

#### (2) 実験結果

締固めエネルギーとコア強度の関係を図-8 示す。締固めエネルギーとコア強度には良い相関がみられることが分かる。つまり、コンクリート強度との関係から、スマートセンサによって締固めエネルギーを把握・管理することで、締固め度合いを評価できると考えられる。

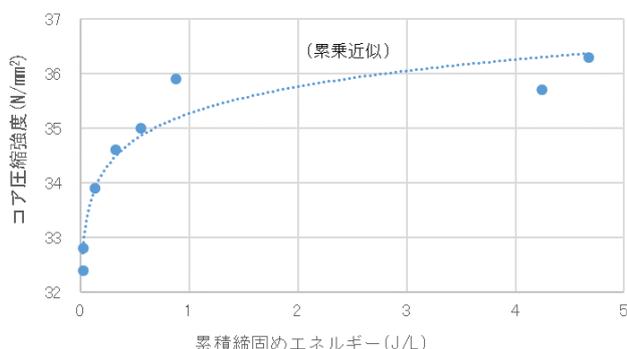


図-8 累積締固めエネルギーとコア強度の関係

## 4. 実構造物による試行

### 4. 1 一般 RC 構造物

コンクリートの振動締固め状況の把握・管理について、一般の RC 構造物を対象に試行的に実施した。

#### (1) 実験概要

試行は 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、格子点情報に基づいて面的にコンクリートの締固め状況の把握を試みた。スマートセンサは樹脂製型枠のほぼ中心部に 1 個設置されており、幅方向で 1800mm、高さ方向で 600mm 間隔 (一部 400mm) の配置である。図-9 にスマートセンサの配置状況を示す。

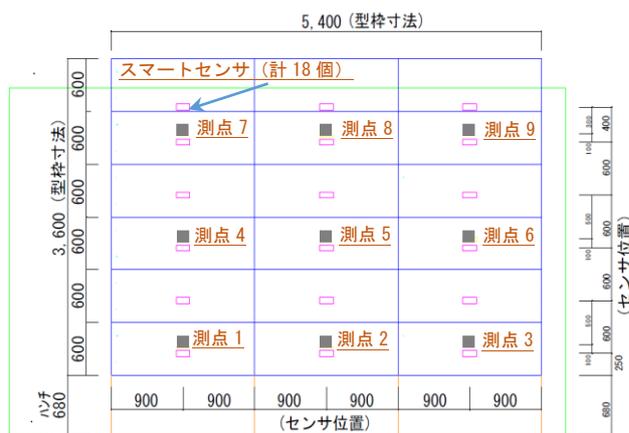


図-9 スマートセンサの配置状況

#### (2) 実験結果

壁部のコンクリートは、1 層の打込み高さを 50cm 程度とし、左端からコンクリートを打込み後、速やかに随時棒状バイブレータで締固めを行った。締固め完了エネルギーを 1.0J/L と定めて図化した一例の締固め度分布の経時変化を図-10 に示す。同図から、型枠配置範囲に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ていることが分かる。

本試行では、適切な締固め完了のエネルギー値を把握するため、コンクリートの表層品質との関係を検証した。

表層品質は、表層部の物性移動抵抗性を定量的に評価できる透気試験 (トレント法) 及び表面吸水試験 (SWAT) によって評価した。測点は 9 点 (図-9) とし、締固めエネルギーは近傍にあるスマートセンサから算出した値とした。締固めエネルギーとコンクリートの表層品質との関係を図-11 に示す。なお、試験時のコンクリート含水率は 5.0~5.5% であった。締固めの度合いにより、締固めエネルギーにばらつきはあるものの、両者には相関がみられ、締固めエネルギーが大きい箇所は透気係数が小さく、また吸水速度も小さい傾向にあることが分かる。コンクリートの表層品質との関係からも、スマートセンサによって締固めエネルギーを把握・管理することで、締固め度合いを評価できる可能性があると考えられる。

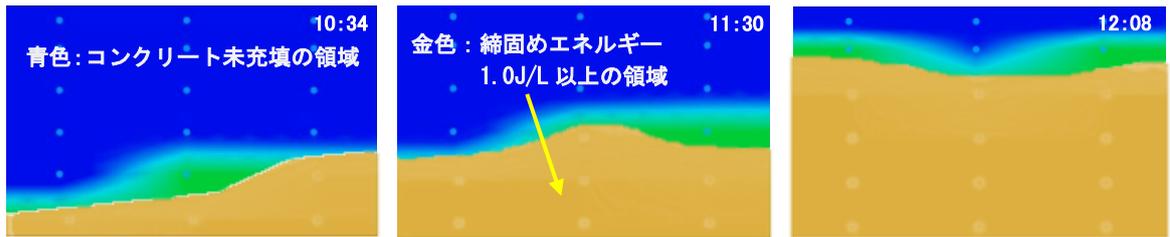


図-10 締固め度分布の経時変化

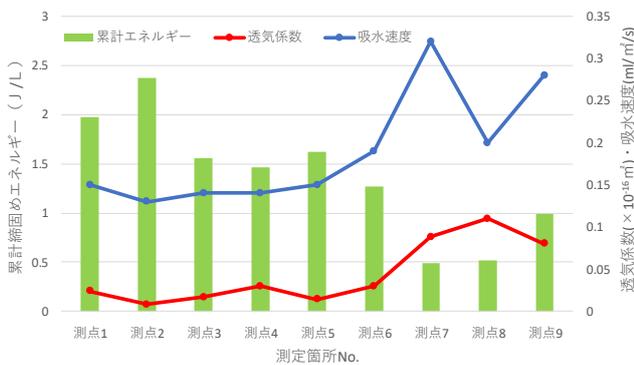


図-11 累積締固めエネルギーと表層品質の関係

#### 4.2 トンネル覆工コンクリート

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、コンクリートの振動締固め状況の把握・管理を試行的に実施した。

##### (1) 実験概要

セントルに搭載したスマートセンサと引抜き式バイブレータの配置状況を図-12に示す。スマートセンサはアーチ部の上に配置し、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、その格子点情報に基づいて面的にコンクリートの締固め状況の把握を試みた。

##### (2) 実験結果

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図-13に示す。緑色部分は、あらかじめ0.5J/Lと定めた締固め完了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、今回設定した締固め完了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-14と図-15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

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締固め完了エネルギーを満たしたことが分かる。引抜き式バイブレータが締固めに有効であること、また締固め状況を視覚的に把握できることを確認した。

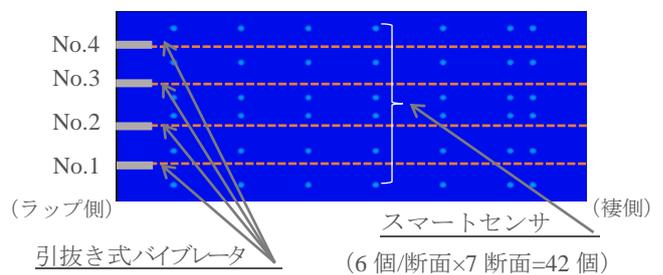


図-12 スマートセンサと引抜き式バイブレータの配置状況

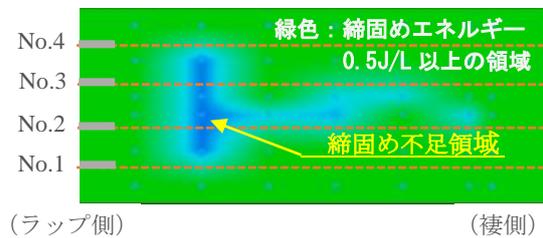


図-13 人力による締固め終了時の締固め度分布

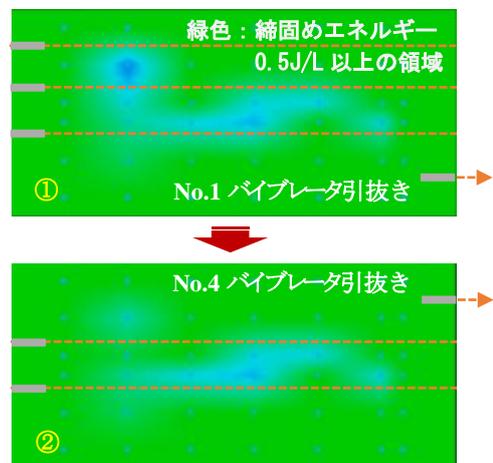


図-14 引抜き式バイブレータによる締固め度分布の経時変化 (①, ②)

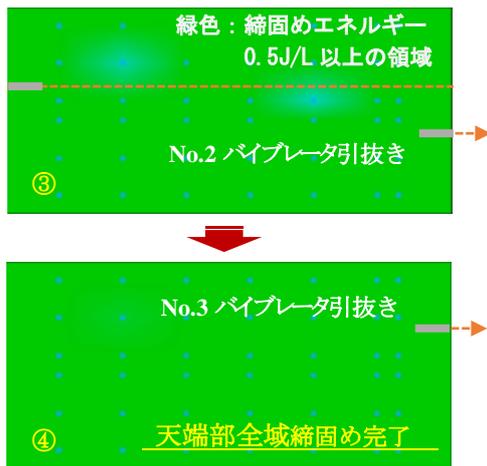


図-15 引抜き式パイプレータによる締め度分布の経時変化 (③, ④)

## 5. まとめ

コンクリート型枠に搭載されたスマートセンサによって、パイプレータによるコンクリート締め時の振動加速度値を加速度センサで捉え、この値から締め状況を把握・管理することを目的に、室内実験および実構造物により試行的に検討した。以下に結果を述べる。

- ① スマートセンサによる加速度測定値は、一般的な加速度計による測定値と同等と評価して良いと考えられる。
- ② 締め完了エネルギーを設定することで、各スマートセンサ位置近傍のコンクリートの締めが完了したと把握・管理できる可能性を見いだした。
- ③ コンクリート強度や、コンクリートの表層品質と

の関係から、締め度合いを評価し、締め完了エネルギーを設定できると考えられる。

- ④ トンネル覆工コンクリートアーチ部において、引抜き式パイプレータが締めめに有効であること、またスマートセンサによって締め状況を視覚的に把握できることを確認した。

## 謝辞

本開発において、複数のスマートセンサの格子点情報に基づいた図化処理にあたっては、株式会社科学情報システムズには多大なるご協力を頂いた。ここに記して深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) NETIS 新技術情報提供システム：  
[http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG\\_NO=QS-110040&TabType=2&nt=nt](http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=QS-110040&TabType=2&nt=nt)（閲覧日：2018年12月20日）
- 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，pp669-670，2013.9
- 3) 山内ほか：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2），土木学会第68回年次学術講演会，VI部門，pp671-672，2013.9
- 4) 梁俊，丸屋剛，坂本淳，宇治公隆：締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