

## 覆工コンクリートの施工状況の見える化

三河内永康<sup>\*1</sup> 藤倉裕介  
関原弦

### 概 要

コンクリートの打込みから養生までの各施工プロセスにおいて、現場計測結果や計測結果に基づいた解析結果を施工管理に有効活用することを目的として、コンクリート内部やその周辺に設置したセンサーの計測結果やそれらのデータに基づいて解析された結果をリアルタイムで表示するシステムについて示した。また、本システムを山岳トンネルにおける覆工コンクリートの施工管理、品質管理手法として現場適用した結果について示し、本システムの適用性と展望を検証した。

### **Development of visualization system for concrete construction based on real-time in-situ measurement and analysis**

#### **Abstract**

In this report, for the purpose of improving construction management of each construction process from concrete placing to curing, we developed a system for displaying analysis and measurement results in real time from sensors placed around concrete construction site. We show how to implement these systems as a quality control method for construction management and we were verified and vision applicability of this system to a tunnel construction site.

キーワード： 覆工コンクリート、現場計測、見える化、品質管理

\*1 建設本部 土木エンジニアリングセンター

## §1. はじめに

近年、公共工事をはじめコンクリート構造物の高品質化、長寿命化への要求が高まっている。コンクリート構造物の品質確保のためには、施工者は材料選定、打込み、締固め、仕上げ、養生に至る施工サイクルを綿密に計画、照査しておくことが重要である。しかし、実際のコンクリート施工は現場で打込み、締固めを行うため、その品質は作業員の経験や熟練度、施工者の管理方法の良し悪しで決定されるといっても過言では無い。また、仕上げ作業のタイミングや養生方法によっては、有害なひび割れや不具合を生じ、表層のかぶりコンクリートの耐久性に影響を及ぼすこともある。

そのため、事前に計画された施工プロセスの履行確認、事前解析の検証、施工状況の記録等を目的とし、様々なセンシング機器や計測システムを用いた現場計測が施工管理の補助的なツールとして活用されている。計測項目としては、コンクリートの充填検知、温度計測、強度推定、含水状態を把握するためのセンサー、コンクリートの養生環境の計測等、用途は多岐に亘り<sup>1)</sup>、<sup>2)</sup>、施工管理に導入した際の有効性も示されている。しかし、施工管理に必要な多くの情報を得ようとすると、計測機器の取扱いや設置にも手間がかかりコストも要するため、一般的な施工において普及しているとはいえない。また、施工時に計測を実施しても作業に従事する作業員や施工管理担当者が施工中にリアルタイムで結果を把握することができず、結果として事後の評価となってしまうことが多いのも現状である。

そのような背景から、著者らはコンクリートの打込みから養生までの施工プロセスにおいて、現場計測結果や温度応力解析結果を施工管理に有効活用することを目的として、コンクリート内部やその周辺に設置したセンサーの計測データをリアルタイムに表示するシステムの開発を行ってきた<sup>3)</sup>。本報告ではシステム全体の概要について示すとともに、山岳トンネルの覆工コンクリートの打設時の施工管理に適用した事例を報告する。

## §2. 施工管理システム

### 2.1 本システムの概要

施工管理システムの概要を図 1 に示す。本システムは、コンクリートの打込みから養生、脱型までの間の施工管理を 1 つのシステムで一貫して行い、施工の省力化と高度化を実現することを目的として開発したものである。図 1 に示すように、本システムはコンクリート打込み時において、その状況をビジュアル的に把握して打上がり高さ、打込み速度、打重ね時間、型枠への側圧等の管理を行う打設時管理シ

ステムと、打込み後の養生中のコンクリートの強度、発熱状況やひび割れ発生確率等の情報を把握することで脱型管理や養生管理を実施する養生管理システムとに分けられる。本システムでは、コンクリート内部、あるいはコンクリート打設部位周辺に無線式の計測センサーを設置し、得られた計測データをパソコンに取り込み、数値解析を行い施工管理に必要な情報をリアルタイムで図化する。また、システムで表示される情報はインターネットや Wi-Fi を介して他のパソコンや現場に持参した携帯端末等でも把握が可能であり、合理的で迅速な管理が可能である。以下にシステムの詳細について示す。

### 2.2 打設時管理システムの概要

#### 1) 打設状況の見える化

コンクリート打設状況の見える化のシステムについて示す。本センサーの原理は、型枠内に設置した計測センサーケーブルのコンクリート打込みに伴って変化する静電容量の変化を連続的に計測することによりコンクリートの打込み高さを把握するものである<sup>3)</sup>。この手法は、静電容量の変化を利用した水位センサーによる既往の手法<sup>4)</sup>と類似した方法であるが、静電容量を捉える電気的な計測回路や計測周波数は異なる。なお、静電容量と打込み高さの関係はおおよそ比例関係になる<sup>3)</sup>。

計測されたデータは図 1 に示すようにタグから無線ルータを介して回収され、パソコンにて解析され、打込み高さを示すグラフや打込み状況を図化して表示する。これらの計測結果の情報は、Wi-Fi 機能を使って別のパソコンやスマートフォンなどの各種端末へ無線で転送することが可能であり、コンクリート打込み箇所、または離れた場所でも計測状況を把握することが可能である。コンクリートの打設状況をリアルタイムで把握することにより、コンクリート打設速度や打設量の把握が可能である。また、打込み後からの時間を表示または色分けすることでコールドジョイントといった施工時に生じる不具合を未然に防ぐことができる。コンクリート打込み時の充填状況の目視確認が困難で、しかも鉄筋量が多い場合や振動締固め機の使用が困難な部位の打ち込み状況の把握、品質管理に有効である。写真 1 に計測用センサーケーブルおよび周辺機器を示す。

#### 2) 圧力監視システム

コンクリート打設時に型枠に作用する圧力を監視するシステムについて示す。トンネルは線状構造物であるため、覆工の構築には長さ 10.5m の移動式の型枠(以下、セントルという)が使用されている。覆工コンクリートは、アーチ状の形状をしており、下端から側壁まではセントルに設けた作業窓からコンクリートの打込みや振動締固め機(バイブレー

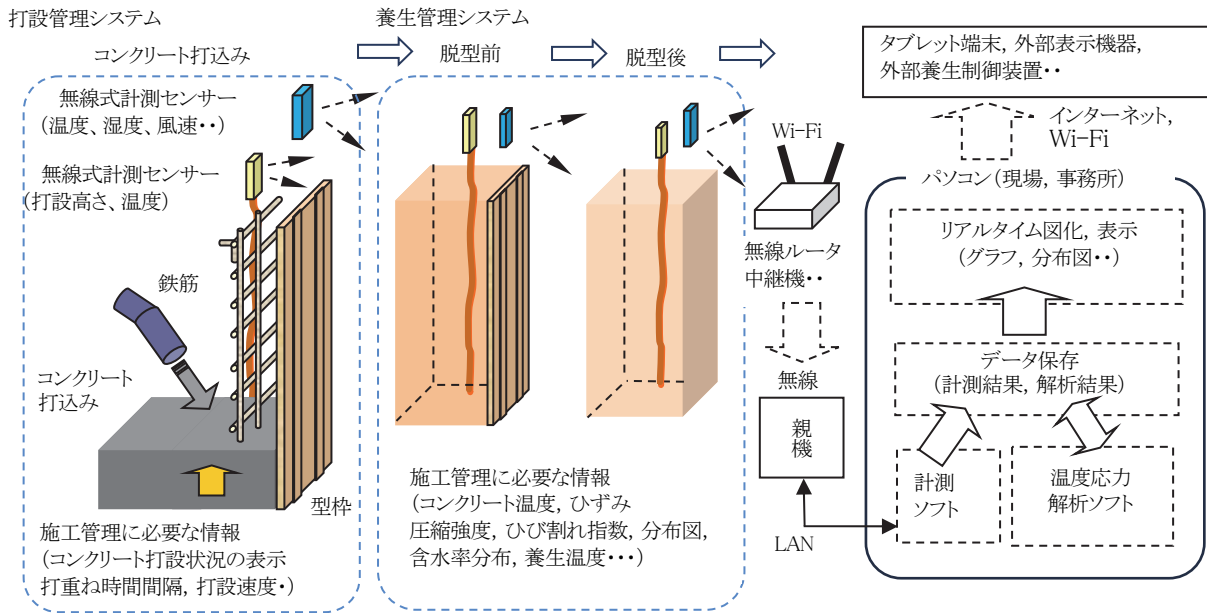


図1 本システムの概要



写真1 計測用センサーケーブルおよび周辺機器



写真2 圧力検知センサー

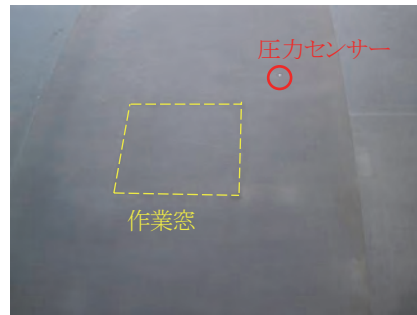


写真3 センサー設置状況(センター表面)

タ)による締固め作業を行うが、左右の打込み高さに差が広がると、センターに偏圧や過度な荷重が作用し変形や移動による表面に弱層部の発生や出来形に不具合が生じる可能性がある。また、天端部はコンクリートポンプを用いた吹上げ方式によりコンクリートを打ち込んでいくため、ポンプの吐出圧が大きくなる傾向があり、センターの破損や沈下による出来形不足が危惧される。また、近年では全国の高速道路株式会社为主体となって建設中の高速道路の覆工コンクリートには、中流動コンクリートが採用されているためセント

ル型枠への側圧が大きくなることが懸念される。

圧力監視システムは、センター表面の各所に圧力検知センサーを設置し、打ち込まれたコンクリートの作用する側圧を把握するものである。このシステムは、センターに作用する圧力をリアルタイムに測定し図化することで、センター全体の状況を把握できることから、圧力が左右均等になるように打込み位置や高さ、時間等を管理することができる。写真2

に圧力検知センサーを、写真 3 にセンサーを設置した時のセトル表面を示すが、セトル面と同じ位置になるように設置し、覆工コンクリートに凹凸がでないようにしている。

### 2.3 養生管理システムの概要

養生管理システムでは、図 1 に示すように現場に設置した温湿度計の計測データを逐次パソコンに取り込み、数値解析などを行い施工管理に必要な情報を供給するものである。今回、トンネル覆工の若材齢強度を把握する強度推定システムについて紹介する。

覆工コンクリートは、2 日に 1 回の打設として設計・積算されている。1 回の打設量は一般に 100m<sup>3</sup> 前後であり、打設時間は大まかに朝から昼過ぎまで、脱型は翌午前中に実施される。土木学会のトンネル標準示方書<sup>5)</sup>によると、通常コンクリート打込み後 12～20 時間で型枠を取り外している例が多く、また取外し時の圧縮強度は、円形アーチのトンネルでは 2～3N/mm<sup>2</sup> 程度を目安としている。このため、型枠を取り外すまでのコンクリートの強度発現を促進するとともに、比較的若材齢での圧縮強度の確認が非常に重要な管理項目となる。

強度推定システムは、セトルの表面に温度センサーを設置し、コンクリートの表面温度を常時計測するものである。温度センサーは、無線通信型の温湿度計であり、測定データは Wi-Fi 機能を使ってパソコンへ無線で転送することができる。このシステムにより、打込み時と養生中のコンクリート温度が測定できるため、事前に試験により定めた積算温度(温度×時間)と圧縮強度の関係式を用いて、実際のコンクリート温度に基づいて圧縮強度を推定し脱型強度を管理することができる。写真 4 にこのセンサーをセトルに設置した状況を示す。

### § 3. 山岳トンネルでの適用事例

山岳トンネルの覆工コンクリートを打設する際に、打設管理システム、圧力監視システム、強度推定システムを導入し、施工管理を実施した事例を示す。この覆工コンクリートは、周長が約 22m、コンクリート厚さが 0.45m と 0.65m、複鉄筋構造のアーチ状断面の構造物である。セトルは鋼製で、長さは 9.0m のものを使用した。コンクリート 1 回あたりの打設量は約 100 m<sup>3</sup> および約 150m<sup>3</sup> である。本事例では、打設管理システム、圧力監視システム、強度推定システムをそれぞれ図 2 に示す位置に配置した。

まず、打設管理システムについては、新たに開発した長さ 11.0m の計測用センサーケーブルを使用し、覆工下端部から天端部の周長方向に左右 3 測線ずつと天端の縦断方向に 3 測線の 1 打設スパン当たり 9 測線を配置した(写真 5、6、7)。本トンネルは全線において複鉄筋構造であったた

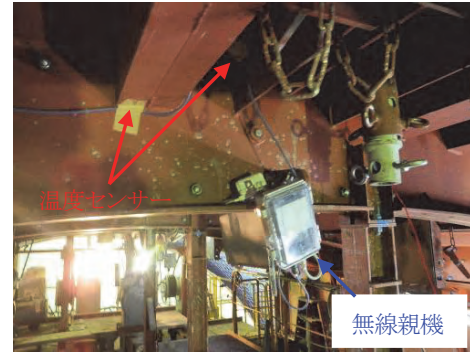
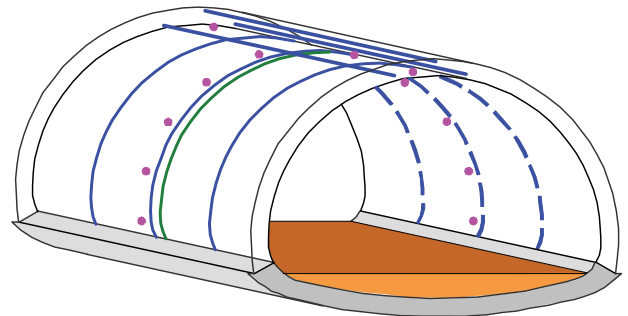


写真 4 センサー設置状況(天端部)



—打設管理システム ●圧力監視システム —強度推定システム

図 2 各種システム設置位置図

め、センサーケーブルは鉄筋に結束した。測定データは、コンクリート打込み時にモニタ表示した。モニタには、覆工下端部から天端部の周長方向の左右中央 1 測線と天端の縦断方向の中央部 1 測線を表示させた(写真 8、9)。

アーチ部では打ち上がり高さが、天端部ではラップ側から妻側への打ち込まれた状況が図化され、リアルタイムに打ち上がり位置等を把握できることが分かる。コンクリートの打込み状況をビジュアル的に把握できるため、決められた打込みステップや打込み速度の遵守、打ち重ね時間などの施工管理をすることができたほか、特に側壁部においては打設高さを左右均等になるように施工管理することができた。また、配管切替えによる打込み位置や振動締め固め機(パイプブレータ)の使用を適切に行うことができた。

次に、圧力監視システムについては、圧力検知センサーを 1 打設長当たり 1 断面とし、セトル下端部から天端にかけて左右 5 箇所ずつと天端部のラップ側と妻側の 2 箇所の、1 打設スパン当たり 12 箇所に設置した(図 3)。測定データはモニタに図化表示(写真 10)し、セトルに作用する全ての場所の圧力の状況をリアルタイムに監視することができた。また、圧力上昇時の打込み速度の調整や左右の圧力差が過度になった場合の打込み箇所の変更等、迅速な施工管理を行うことができた。

強度推定システムについては、無線通信型温度センサ



写真5 ケーブル設置状況(側壁部)



写真6 ケーブル設置状況(天端部)

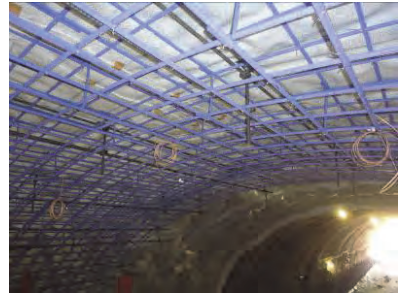


写真7 ケーブル設置(天端部3測線)

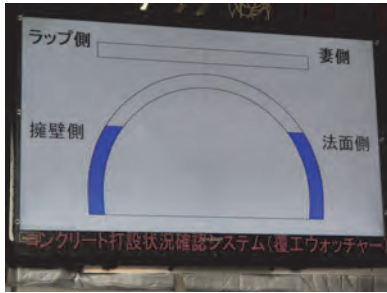


写真8 打設位置表示(周長方向)

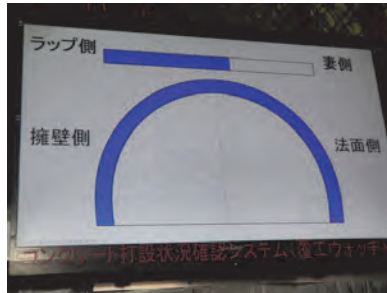


写真9 打設位置表示(縦断方向)

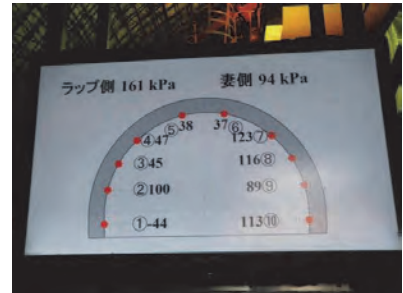
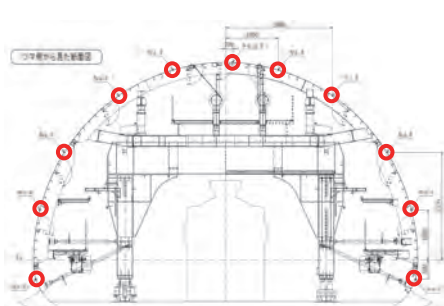


写真10 圧力表示状況位置



(セントル横断面)



(セントル平面面)

図3 圧力検知センサ設置位置

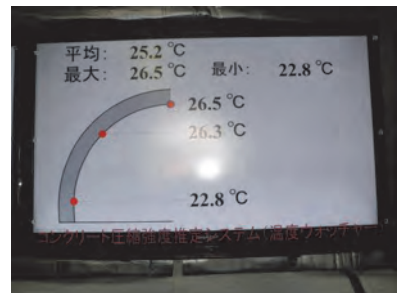


写真11 温度表示(天端,肩,SL)

一をトンネル半断面の天端部から側壁部のセントル表面(内空側)に設置し、セントル表面の天端から脚部の全ての測点(10 測点)の温度を一度に測定した。測定データは、天端部、肩部、SL 部の温度をモニタ表示させた。コンクリート打設中は打込み箇所の温度分布を把握(写真11)し、コンクリート打設終了後は、最終の打設箇所となる天端部の温度を基に、積算温度( $\Sigma$  温度 $\times$ 時間)と圧縮強度の関係によりコンクリートの圧縮強度を予測して脱型時期を管理した(写真12)。

なお、各システムの表示モニタは、覆工施工場所のセントルに設置した大型モニタに表示し、覆工コンクリートの打込み状況、圧力、温度分布を可視化することにより常時誰でも施工状況を把握できるものとした(写真13)。

これら各種のモニタリングセンサを用いた施工管理システムでは、全ての計測データが電子化できる。打設管理シス

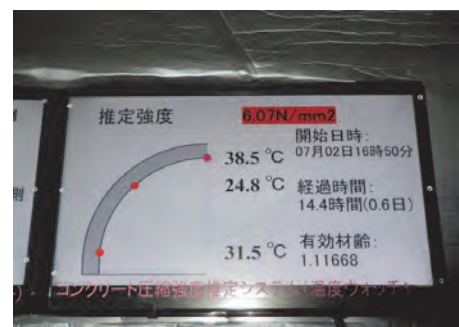


写真12 積算温度と推定圧縮強度表示

テムを用いて測定したコンクリートの打ち上がり高さデータの実測値を用いて、打込み状況を三次元的に表示したものを図4に示す。三次元的に表示することで、コンクリートの打設状況が非常に分かりやすくなる事が分かる。特に有筋区間の覆工コンクリートの天端付近の打込み時は充填状況の目視確認が困難で、振動締め機の使用が困難な部



写真 13 大型モニタ設置状況

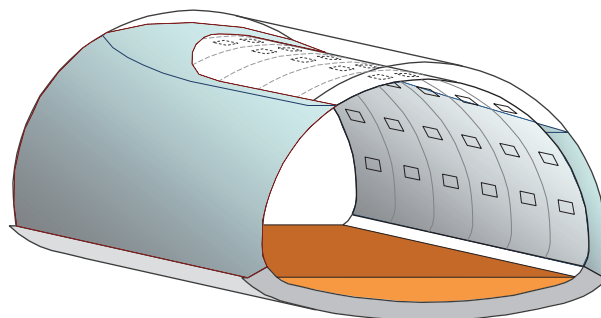


図 4 打込み状況の三次元での見える化

位の打設状況の把握、品質管理に有効である。更に、本システムではコンクリート打設速度や打設量の把握が可能であり、打込み後からの時間を表示または色分けすることもできるため、コールドジョイントといった施工時に生じる不具合を未然に防ぐことができる。

#### §4. おわりに

本報告では、コンクリートの打込みから養生までの各施工プロセスにおいて、現場計測結果等を施工管理に有効活用することを目的として、コンクリート内部やその周辺に設置したセンサーを用いてコンクリートの施工状況を管理する各種施工管理システムについて紹介するとともに、本システムを山岳トンネルにおける覆工コンクリートの施工管理に適用した事例を紹介した。特に、大型モニタに施工状況をリアルタイムに表示させることで、実際に打込み作業、締め作業を行う作業員の品質への意識も高まり、事前に打ち合わせた施工計画が確実に遵守できることが分かった。また、圧縮強度の発現状況についても大型モニタで表示することで、所定の圧縮強度が得られた段階で脱型作業を行うことができ、所定の品質を確保できることが分かった。

これら施工状況の可視化や電子化は、施工データを蓄積、分析することで、プロセスのチェックや施工手順の見直し等のフィードバックが可能となる。また、施工技術の伝承や自動化にも寄与できる。さらに、施工プロセスのデータベース化により、CIMに対応した施工状況のトレーサビリティとして、供用後の維持管理にも活用できるものと考えられる。

本システムは多種類の計測機器を用いた手法として拡張が可能である。今後、膨大な現場計測データを活用するとともに、それに基づいた品質管理のロジックを開発することで、更に高度な施工方法の自動制御が可能となり、建設作業の効率化、省力化が実現でき、これまで以上に高い品質と耐久性を確保した土木構造物を構築することができると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 湯浅昇、笠井芳夫:非破壊による構造体コンクリートの水分測定法、コンクリート工学、Vol.32、No.9、pp.49-55、1994.9
- 2) 平田隆祥、佐野禎、十河茂幸:コンクリートの水和過程の水分モニタリング技術の紹介、コンクリート工学、Vol.44、No.5、pp.45-49、2006.5
- 3) 藤倉裕介、関原弦、友近誠、相良誠:現場計測データとリアルタイム温度応力解析による打込みから養生までのコンクリート施工管理システムの開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、No.1、pp.1600-1605、2014.7
- 4) 坂井吾郎、万木正弘、坂田昇、岩城実:品質保証を考慮した高流動コンクリートの施工について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.233-238、1993.7
- 5) (社)土木学会:2006年制定トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説、2006.



#### ひとこと

コンクリート構造物の高品質化、高耐久化に対するニーズは高い。本システムを活用することで、安定的な品質を確保するとともに、施工の合理化、省力化が実現できるものと考えられる。

三河内 永康