

施工管理システムを用いた覆工コンクリート等の可視化、電子化システムの開発

(株)フジタ建設本部 正会員 ○三河内永康

(株)フジタ技術センター 正会員 藤倉 裕介

(株)フジタ技術センター 正会員 関原 弦

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向上のためには、施工者は使用材料であるコンクリートの力学性能、耐久性能やひび割れ抵抗性といった時間軸で要求される性能を照査するとともに、打込み、締固め、仕上げ、養生に至る施工サイクルを事前に検討しておくことが必要である。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、コンクリートの養生環境の計測等、用途は多岐にわたり^{1), 2)}、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、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³⁾。

本報告では、システム全体の概要について示すとともに、橋梁下部工や山岳トンネル分野の現場に適用した事例について報告する。

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、当初、橋脚コンクリートやボックスカルバートを対象に開発された。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、打重ね時間間隔の管理を行う打設管理システムと、打込み後の養生中のコンクリートの温度、強度、発熱状況やひび割れ指数等の情報を把握することで脱型管理やマスコンクリートの温度ひび割れ対策を行う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モニタ等に図化する。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となる。

今回、このようなコンクリートの打込みから養生までの施工管理システムを、山岳トンネルの覆工コンクリート

キーワード マスコンクリート、覆工コンクリート、橋脚、トンネル、施工管理、可視化

連絡先 〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-25-2 TEL03-3796-2298

ートの施工に応用するため、セン
トル型枠に作用
するコンクリ
ート圧力を監視す
る圧力監視シス
テムと、コンクリ
ートの温度計測
に基づく強度推
定システムを追
加し、施工管理を
実施した。

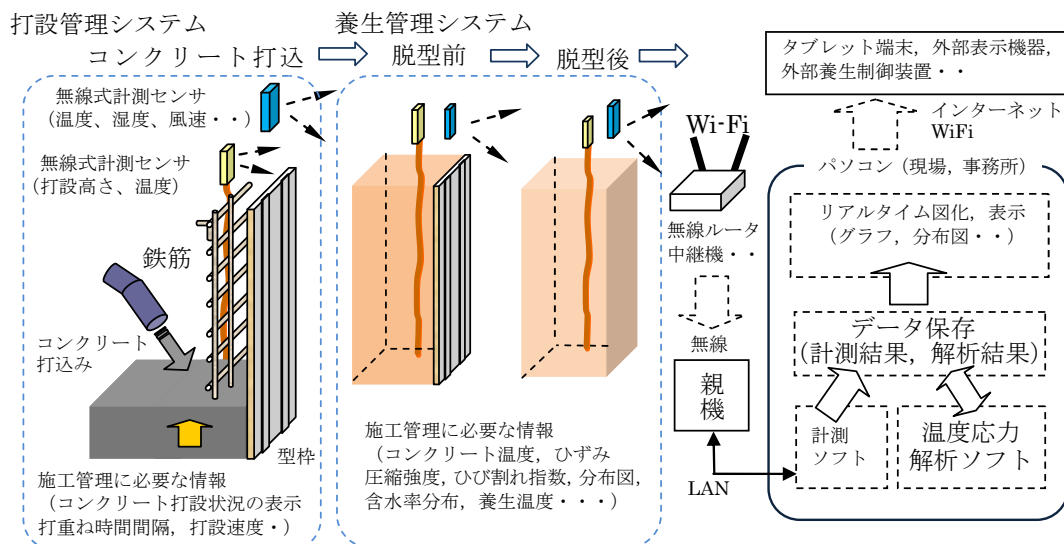


図-1 本システムの概要

2.2 打設管理システム

打設管理システムは、図-1 に示すように型枠内に設置したセンサによりコンクリートの打込み高さを把握するものであり、複数本設置したセンサの計測結果を2次元あるいは3次的に図化することによりコンクリートの打込み状況を把握することができるシステムである。

本センサの原理は、型枠内に設置した計測センサ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。計測原理の概要を図-2 に示す。図-2 (a)は何も充填されていない空の円筒に計測ケーブルを鉛直に設置した状況を示す。計測センサケーブルは一定の間隔を持った2本の線により構成されており、この間には静電容量がある。一般に、空気中における比誘電率は小さく、計測センサケーブル全体の静電容量は少ない。(a)の円筒の例では静電容量の合計値は14(ファラド、以下Fとする)である。一方、水などの液体をはじめフレッシュコンクリートでは一般に比誘電率が空気の約80倍と大きくなり、図-2 (b)に示すように約半分までコンクリートが打ち込まれると、その合計値は646(F)、打込み完了後は1120(F)となる。

すなわち、コンクリートの打込み高さと静電容量の関係を事前に調べておくことにより、コンクリートの打込み高さを連続的に検知できるわけである。この手法は、静電容量の変化を利用した水位センサによる既往の手法⁴⁾と類似した方法であるが、静電容量を捉える電氣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³⁾。また、このセンサはコンクリートの硬化過程における測定にも応用が可能である。すなわち、コンクリートの硬化過程ではセメントの水和反応により水分が減少して硬化体が形成され静電容量は低下する。図-2 (c)の例では静電容量の合計は840(F)となり、固体部分の静電容量の影響が小さいものと仮定すると、この低下量を把握することで消費、逸散により減少した水分量を求めることが可能となる。

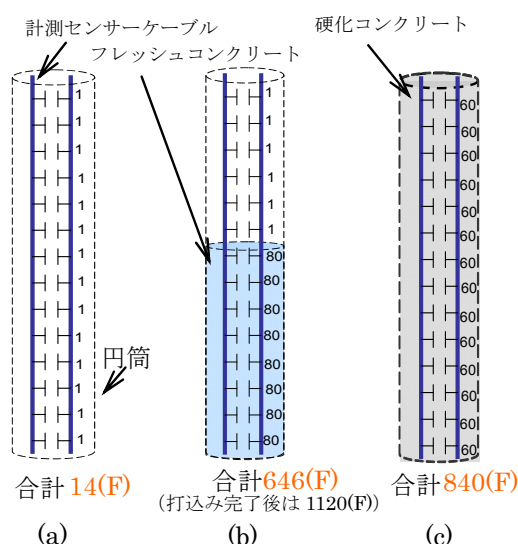


図-2 打設管理システムの概要

また、計測されたデータは、図-1 に示すように通信用タグから無線ルータを介してパソコンに回収され、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（バイブレータ）の使用が困難な部位の打ち込み状況の把握、品質管理にも有効である。写真-1 には、計測用センサケーブルおよび周辺機器を示す。この打設管理システムは、現在、国土交通省の新技术情報提供システム（NETIS）に登録（KT-140049-A：コンクリート充填ウォッチャー）されている。



写真-1 計測用センサケーブルおよび周辺機器

2.3 圧力監視システム

トンネルは線状構造物であるため、覆工の構築には移動式の型枠（以下、セントルという）が使用されており、一般的には 10.5m の長さとなっている。覆工コンクリートの形状は、アーチ状をしているが、トンネル周囲には地山が存在するため、地山の内側に型枠を設置し、その間の狭い空間にコンクリートを打ち込むこととなる。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による締固め作業を行うが、左右の打込み高さの差が大きくなると、セントルに偏圧や過度な荷重が作用して変形や移動が生じ、表面に弱層部が発生したり出来形が規格値外になったりする可能性がある。また、天端部は作業窓からの打込みが困難であるため、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。天端部は空隙が残らないようにブリーディング水や空気を排出しながら完全に充填するとともに締め固める必要がある。このため、コンクリートポンプの吐出圧が大きくなる傾向があり、閉塞された天端空間のコンクリート圧力がセントルに作用して、セントルの破損や沈下による出来形不足が危惧される。また、現在、全国的高速道路株式会社が主体となり建設している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。中流動コンクリートは、スランプフローが 35～50cm 程度であり、コンクリートの硬化時間が遅延する場合には、側圧が大きくなることもある。



写真-2 圧力検知センサ

圧力監視システムは、セントル表面の各所に圧力検知センサを設置し、打ち込んだコンクリートがセントル面に作用する側圧を調べるものである。このシステムは、セントルに作用する圧力状況をリアルタイムに測定し、セントル表面の圧力分布が全体的に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 には、圧力検知センサを、写真-3 には、センサを設置した時のセントル表面を示すが、セン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生じないようにした。

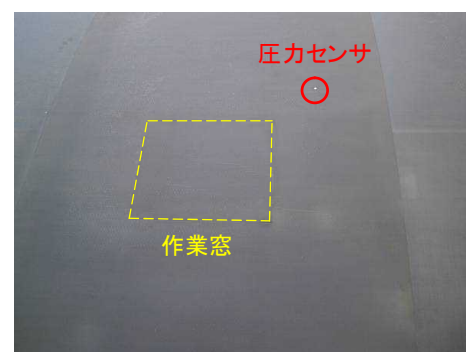


写真-3 センサ設置状況（セントル表面）

2.4 強度推定システム

覆工コンクリートは、2 日に 1 回コンクリートを打設するように設計・積算されている。1 回の打設量は、一般に 100m³ 前後であり、打設時間はだまかに朝から午後までで、脱型は翌朝となっている。「2006 年制定 トンネル標準示方書 [山岳工法]・同解説（土木学会）」では、「型枠は、少なくとも打ち込んだコンクリートが自重に耐えられる強度に達した後でなければ取り外してはならない。型枠を取り外してよい時期は、コンクリートの種類、トンネルの大きさ、形状、覆工巻厚および施工条件等によって異なるが、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い。また取外し時の強度は、円形アーチのトンネルでは、

コンクリートの圧縮強度が $2 \sim 3 \text{ N/mm}^2$ 程度を目安としている場合が多い。」⁵⁾とされている。このため、型枠を取り外すまでのコンクリート圧縮強度の発現が非常に重要となっており、FRP 製セントルやセントルの加温、セントル 2 基による脱型までの時間の長期化等の技術開発が行われている。近年では、一般に打設期間の初期段階に、若材令時の圧縮強度試験を実施し、所定の強度に達するまでの養生時間を設定して脱型している。若材令強度試験とは、覆工の最終打設箇所であるトンネル天端部のコンクリート打ち込み時に供試体を採取し、その供試体を天端部に置いておく。供試体は、実際の覆工コンクリートの天端部と同じ条件で養生し、若材令時間（打設終了後 12～20 時間）経過後に生コンプラントで圧縮強度試験を行い、若材令強度を求めるものである。コンクリートの若材令時の圧縮強度は、練り上がり時や打込み中、養生中のコンクリート温度等に大きく依存するため、コンクリート温度を一定時間ごとに測定することが非常に重要となってくる。

強度推定システムは、セントルの表面に温度センサを設置し、コンクリートの表面温度を常時計測するものである。温度センサは、1 線多点式無線通信型の温湿度計で 1m 間隔に温度センサがあり、1 線で 10 点の温度を一度に測定することができる。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。ここに、セントルは耐久性等の観点から鋼製のものが多く、熱伝導率が高いため、セントル内側の表面温度と外側のコンクリート面の温度が同じ程度になると仮定している。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、事前に設定した積算温度（ Σ 温度 $\times$ 時間）と圧縮強度の相関を用いて、実際のコンクリート温度を基に、圧縮強度を推定し脱型強度や時間を管理することができる。写真-4 には、1 線多点式無線通信型温度センサを、写真-5 には、このセンサをセントルに設置した状況を示す。



写真-4 1 線多点式無線通信型温度センサ

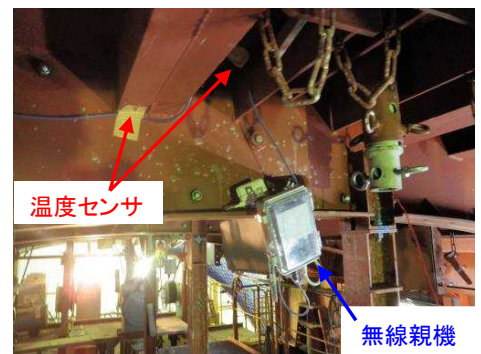


写真-5 センサ設置状況（天端部）

3. 現場適用事例

3.1 橋梁下部工の橋脚コンクリート

ここでは、橋梁下部工の橋脚コンクリートを打設する際に、打設管理システムを適用した事例を示す。この橋脚は、長辺 9.5m、短辺 6.5 m、コンクリート厚さ 1m の中空の長方円形の断面をした構造物であり、コンクリート 1 回当たりの打設高さは 5m である。高密度の配筋となっており、コンクリートの打設速度や打設高さを一定にしながら打設を行う必要があることから、本システムの適用を行ったものである。計測センサケーブルおよび通信用タグの設置状況を写真-6 に示す。計測センサケーブルは、別途用意した鉄筋に沿わせて鉛直に設置し、柱断面の内側 8 箇所と外側 10 箇所



写真-6 計測機器の設置状況

に等間隔に、それぞれ表面からかぶり深さの位置に設置した。

コンクリートの打設開始時から計測をはじめ、打込み状況をリアルタイムに表示した。写真-7 には、スマートフォンを用いて遠隔にて



写真-7 遠隔場所での打込み確認状況

打ち込み状況を把握している状況および打ち込み状況のビジュアル画面を示す。この画面では、橋脚の外側に円周状に設置した 10 点の計測結果を円周状の 2 次元の展開図として表示している。図中には、各計測センサの打ち込み高さ、打上がり速度、コンクリートが打ち込まれてからの経過時間が示されている。本システムの適用により、作業状況が明確となりポンプ車の筒先位置やバイブレータの使用を適切に指示することができ、コンクリートの一層あたりの打設高さや打設速度を施工計画どおりに実施できることが分かった。また、施工状況がビジュアル化され、その画面を現場で見ることにより、打ち込み作業や締め作業を実際に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。本システムのような施工の可視化技術を施工管理に有効活用することで、施工時の不具合を防止するとともに、作業員の熟練度の影響を低減できるものと考えられる。

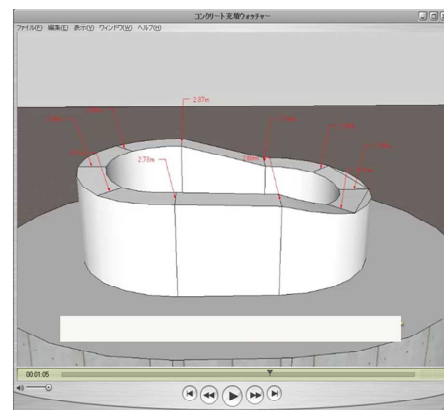
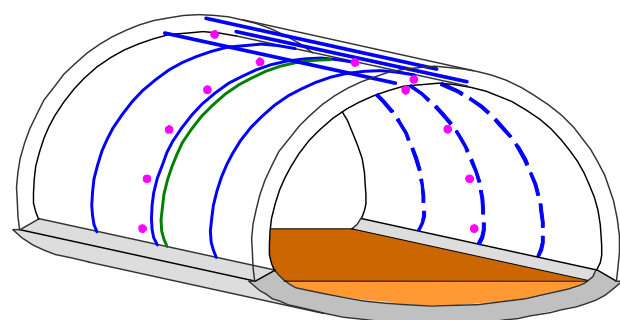


図-3 3次元での打ち込み状況の図化

図-3 には、打ち込み状況を 3 次元で図化した状況を示す。施工中のリアルタイムでの表示には情報量が多いなどの課題があるが、型枠の中の見えないコンクリートの打ち込み状況全体が一目で確認できるため、例えば、均一な打ち込み高さを維持するための筒先位置や作業員の配置の指示、作業の進捗状況や残りのコンクリート量の把握等、迅速な対応が可能となり施工管理の効率が向上するものと考えられる。

3.2 山岳トンネルの覆工コンクリート

ここでは、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形状の断面となっている。セントルは鋼製で、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 m³ および約 150m³ 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-4 に示す位置に配置した。



—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-4 各種システム設置位置図

まず、打設管理システムについては、計測センサケーブルを使用して、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 打設スパン当たり合計 9 測線を配置した（写真-8, 9, 10）。センサケーブルは、防水シートに直接ガムテープ等で貼ると、その部分の静電容量を検出せずに測定誤差が大きくなる。本トンネルは、全線において複鉄筋構造であったため、鉄筋に結束した。



写真-8 センサケーブル設置状況(側壁部)

測定データは、コンクリート打ち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部 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-11, 12）。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



写真-9 センサケーブル設置状況(天端部)



写真-10 センサケーブル設置(天端部 3 測線)

込まれた長さが描かれ、リアルタイムに打ち上がり位置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管理ができた。特に、側壁部においては、打設高さが左右均等になるように、配管切替えを行なうなど、施工管理に役立った。

次に、圧力監視システムについては、1打設長当たり1断面とし、圧力検知センサをセントル下端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、合計12箇所に設置した(図-5)。測定データはモニタに図化表示(写真-13)し、セン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など、迅速に対応することができた。

また、強度推定システムについては、1線多点式無線通信型温度センサを、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側壁まで全ての測点(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には、打込み箇所の温度分布を把握(写真-14)し、コンクリート打設終了後は、最後打設となる天端部の温度を基に、積算温度と圧縮強度の相関によりコンクリートの推定圧縮強度を予測して脱型時期を管理した(写真-15)。

なお、各システムの測定データは、セントルに取り付けた大型モニタに表示し、覆工コンクリートの打込み状況を可視化することにより、いつでも、誰でも、施工状況が把握できるものとした(写真-16)。

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。図-6には、打設管理シス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を用いて、



写真-16 大型モニタ設置状況

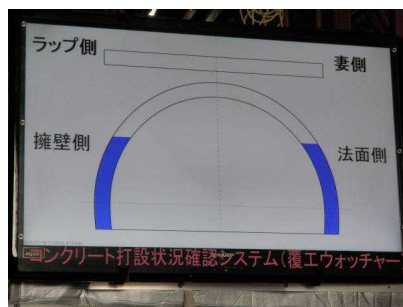


写真-11 打設位置表示(周長方向)

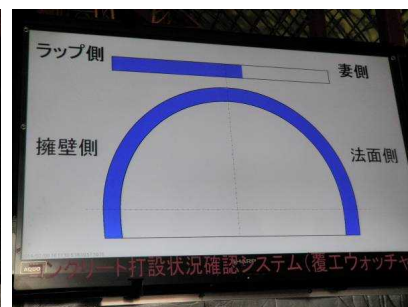
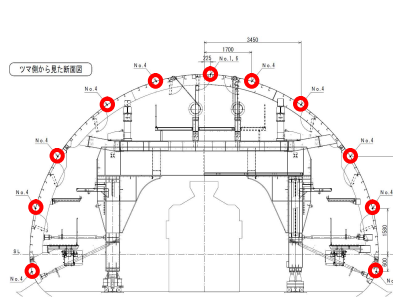
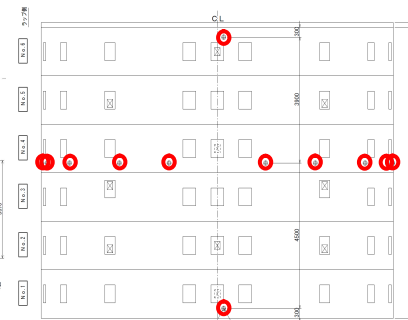


写真-12 打設位置表示(縦断方向)



(セントル横断面)



(セントル平面図)

図-5 圧力検知センサ設置位置



写真-13 圧力表示状況位置

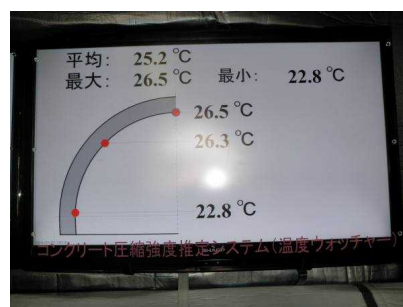


写真-14 温度表示(天端, 肩, SL)



写真-15 積算温度と推定強度表示

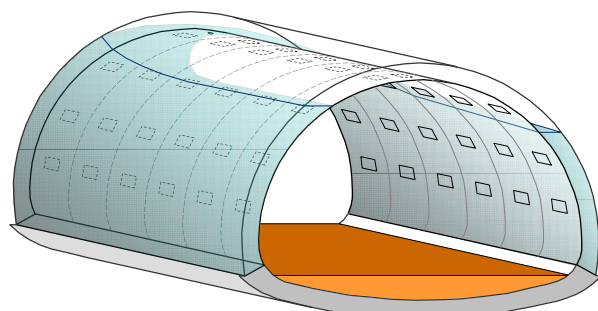


図-6 打込み状況の簡易三次元化

打込み状況を簡易三次元化したものを示す。

4. まとめ

本報告では、コンクリート内部やその周辺に設置したセンサを用いてコンクリートの施工状況を管理する施工管理システムについて紹介した。このシステムは、コンクリートの打込みから養生までの各施工プロセスを現場計測（電子化）するとともに、パソコンや携帯端末に表示（可視化）させた。また、本システムを現場適用した事例を、さまざまな土木分野から紹介した。特に、山岳トンネルの覆工コンクリートでは、施工状況を大型モニタにリアルタイムに表示させた事例であった。

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、施工プロセスのチェックや次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 等に対応した施工状況のトレーサビリティとして、維持管理にも活用できると考える。

今後は、計測機器の多種類化による施工方法等の制御が可能となり、建設作業の効率化・省力化が実現できるとともに、これまで以上に品質・耐久性の高い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量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.