

報告 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

藤倉 裕介*1・関原 弦*2・友近 誠*3・相良 誠*3

要旨: 施工者は施工による不具合を未然に防ぐとともに、合理的で経済的な施工計画を立案することが必要である。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す。また、本システムを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。

キーワード: 打込み, 現場計測, ビジュアル化, マスコンクリート, 施工管理

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。

一方、土木構造物の多くは部材寸法の大きなマスコンクリートとなることが多く、セメントの水和発熱に起因した温度応力が発生してひび割れを生じる。そのため、温度応力によるひび割れ発生確率を事前に照査するとともに、有害なひび割れ幅以下となるような対策を検討する必要がある。近年では、学協会の指針類をはじめ照査方法が確立され3次元FEM法による汎用解析ソフトが開発されている。また、事前の解析結果に基づいて発注機関と施工者が温度ひび割れ対策や不具合も軽減するような工夫に取り組む事例も報告がなされている¹⁾。しかし、実際に打ち込まれたコンクリートの温度分布や応力状態、ひび割れの発生状況が事前の照査結果と異なり、想定以上のひび割れが生じるケースも多くある。

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^{2), 3)}、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いうことが多いうのも現状である。

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結果やそれらのデータに基づいて数値解析した結果をリアルタイムで表示するシステムの開発を行っている⁴⁾。本報告ではシステム全体の概要について示すとともに、コンクリート打設状況をビジュアル化するシステムや逐次取り込まれた現場の外気温湿度の計測結果を境界条件として数値解析を行い現状のコンクリートの強度や発熱状況、ひび割れ指数等の解析結果を表示するシステムについて示し、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

*1 (株)フジタ 技術センター土木研究部 主任研究員 博士(工学)(正会員)

*2 (株)フジタ 技術センター先端システム開発部 主任研究員

*3 (株)フジタ 建設本部土木エンジニアリングセンター 次長 修士(工学)(正会員)

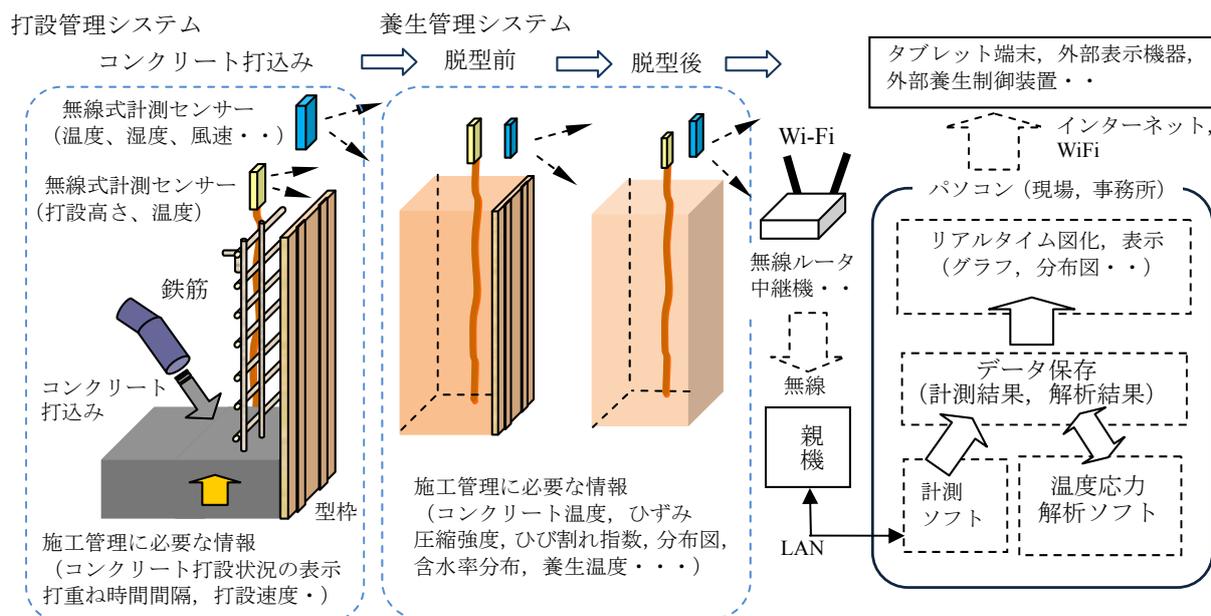


図-1 本システムの概要

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WiFi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。以下に上記の2つのシステムについて示す。

2.2 打設管理システムの概要

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ー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、複数本のセンサーの計測結果を2次元あるいは3次元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。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

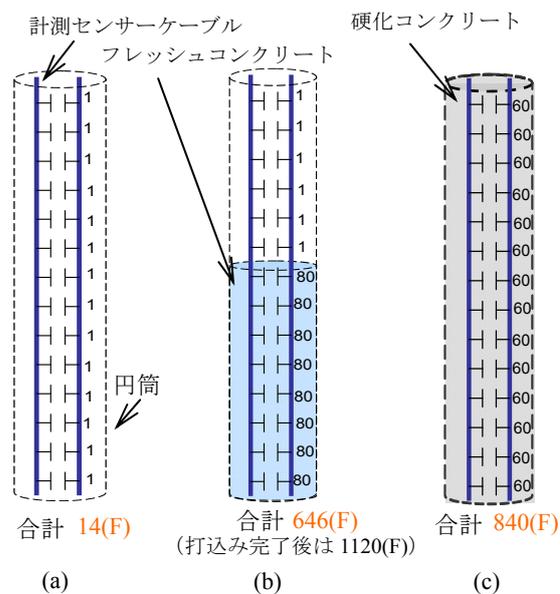


図-2 計測原理の概要

サー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。一般の空気中における比誘電率は小さく、計測センサー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(F)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

サーによる既往の手法⁵⁾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⁴⁾。また、このセンサー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できる。コンクリートの温度分布の影響等、水分量推定の精度には課題があるが、あらかじめキャリブレーションしておくことで圧縮強度等の物性の推定も可能である⁶⁾。

また、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。

コンクリートの型枠内への充填状況を把握する方法としては、例えば、印加電圧残留値を用いた手法²⁾や静電容量を用いた手法³⁾が電氣的な手法として提案されており、実際の現場における活用事例も報告されている。しかし、これら既往のセンサーではセンサー設置位置の点での情報を得るものであり、コンクリートの充填状況を全体的に捉える場合や打込みの範囲を面的に捉えるためには、複数個のセンサーの設置が必要になる。また、これらのセンサーは有線式のものが多く、現場での配線の取り回しに手間を要する。更に無線での計測が可能なものやコンクリートの充填状況を携帯端末などにリアルタイムで表示して施工管理の利便性を高められるように拡張された事例は少ない。近年のICT技術に目を向ければ、その進歩は目まぐるしく、日常生活に多くの利便性をもたらしている。これらの技術を建設現場に応用した事例も増えつつあり、計測技術の活用手法に取り入れることも重要である。



写真-1 計測用センサーケーブルおよび周辺機器

一方、コンクリート中の水分は、フレッシュコンクリートの打込みに必要な流動性を与えるだけでなく、強度発現に必要なセメントの水和反応、コンクリートの収縮とクリープの進行、耐久性などの特性を決定づける重要な役割をもつ。そのため、硬化コンクリート中の水分の分布や状態を把握する要求は高く、古くからその手法が検討されている²⁾。例えば、セラミック素子を用いた研究²⁾では、配合条件が異なる場合の含水率を推定するなど、精細な研究例が報告されている。また、内部湿度計を用いて内部の含水状態を評価する事例⁷⁾も報告されている。これらの手法では小型のセンサーを用いており、実際の構造物内の含水状態のばらつきや施工時の品質管理への適用性を考えた場合、その評価が難しい。実際のコンクリート構造物への適用にあたっては、本システムで提案しているようにある程度広い範囲で水分の状態を捉え平均的に扱う手法も必要であると考えられる。

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、そのデータをコンクリートの養生温度の境界条件としてFEM法による温度応力解析を行うものである。前項で示した打設管理システムで計測されたコンクリート打設温度、打設高さとその時の時刻の関係は、温度応力解析を行う際のモデルの初期条件として反映される。温度応力

解析を実施する際において同一日に打設される部位をモデル化する場合、部位全体のコンクリートがある時刻に打込まれる設定とするのが通常である。しかし、土木構造物のように大きな部位のコンクリート打設は数時間から半日をかけて行われるものであり、打設時刻によってコンクリートの初期温度は異なる。すなわち、同一日に打設される部位を複数回の打設部位としてモデル化することで実際の施工状況を再現した解析を実施しようとするものである。

外気温湿度計は複数個設置することができ、コンクリート構造物の打設リフトごと、あるいは仮囲いやシートに覆われて加温された条件など、任意の場所に計測機器を設置することでコンクリートの養生環境を考慮した解析を実施する。施工前の事前に行う温度応力解析の結果と実際に打ち込まれたコンクリートの温度やひずみなどの計測結果とが異なる理由としては、解析対象のモデル化、解析ステップなどの問題もあるが、温度応力解析時に設定する境界条件の一つである外気温（コンクリートの養生温度、雰囲気温度）とコンクリートの打込み温度（初期温度）が実際とは異なることが主要因であると考えられる。本システムではこの点に着目し、汎用 FEM 温度応力解析ソフトに改良を加え、現場の外気温データを用いながら逐次解析し、その結果をリアルタイムで図化する手法を構築したものである。外気温湿度は数分ごとにパソコンに取り込まれ、温度応力解析は 30 分～1 時間ごとのステップで実施し、解析結果を逐次表示することで現時点のコンクリートの圧縮強度、コンクリート温度、ひび割れ指数、あるいはコンクリート温度やひび割れ指数の時刻歴グラフやモデル断面のコンター図等をパソコンに表示する。また、1 日後あるいは数日後におけるコンクリートの状況の予測機能も有している。これらの計測結果の情報は、打設管理システムと同様に 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から離れた場所でも計測状況を把握することが可能である。また、インターネットを介して情報を各部署で共有することも可能である。コンクリートの現状の状態をリアルタイムで把握できることで、ひび割れ対策のための養生や、周辺装置への制御を迅速に行うことができる。

また、本解析システムでは打設時のコンクリートの情報とその後の現場の養生環境（外気温湿度）の計測結果に基づいて温度応力解析を行うものであるが、コンクリートの内部温度を別途計測している場合には、計測結果を同様に無線で取り込み、図化するとともに本システムによる解析結果と比較解析に使用するコンクリートの熱物性を見直す機能も付与している。すなわち、コンク

リート温度の計測結果と解析結果が大きく異なる場合には、計測結果に基づいてコンクリートの断熱温度上昇特性や熱物性、あるいは熱伝達境界条件の数値を見直し、解析条件に反映させることで本システムによる解析結果の推定精度を向上させることもできるものとしている。

3. 現場適用事例

3.1 打設管理システムの適用例

開発したシステムを建設現場への適用した事例を報告する。本工事は、フーチング部と中空の柱からなる道路橋脚を築造する工事であり、柱のコンクリート打設の際に本システムを適用した例を示す。柱は長辺 9.5m、短辺 6.5m、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。高密度の配筋が配置されており、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。計測センサーケーブルおよび通信用タグの設置状況を写真-2 に示す。計測センサーケーブルは別途用意した長さ 5.5m の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開始し、打込み状況をリアルタイムで表示を行った。写真-3 にはスマートフォンを用いて遠隔にて打ち込み状況を把握している状況を示す。また、打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ーの打込み高さ、打上り速度、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振動締め機の使用を適切に実施でき、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通りに実施できることが分かった。また、施工



写真-2 計測機器の設置状況



写真-3 遠隔での確認状況

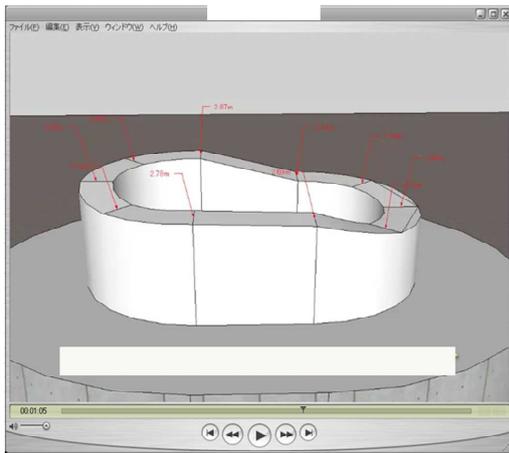


図-3 3次元での打込み状況の図化

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、実際に打込み作業、締固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。本システムのような施工の「見える化」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ぐとともに、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には打込み状況を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込み状況全体が一目で確認ができるため、例えば、均一な打込み高さを維持するための筒先位置の指示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 養生管理システムの適用例

前項と同様の道路橋脚に適用した事例を示す。コンクリート打設箇所周辺に温湿度センサーを設置し計測結果を数分ごとにパソコンに取り込み、このデータを境界条件として1時間ごとに温度応力解析を実施した。解析結果は温度分布やひび割れ指数の分布図（コンター図）や事前に指定しておいた節点におけるコンクリート温度、ひび割れ指数を図化した。図-4に計測結果、解析結果

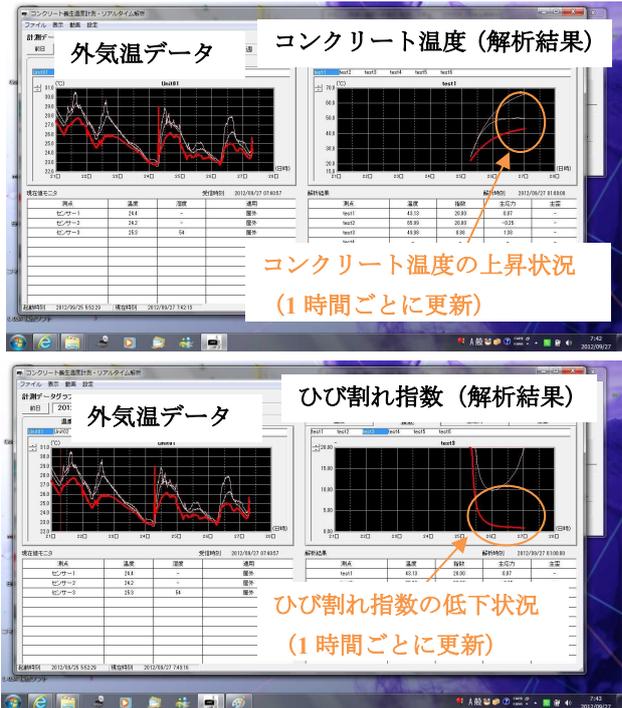


図-4 計測結果、解析結果の表示状況

のパソコンでの表示画面を示す。画面の左側は現場の外気温湿度やコンクリート温度などの計測結果を表示し、右側は温度応力解析結果を表示している。図-4には外気温湿度の計測結果とあらかじめ指定しておいた節点のコンクリート温度とひび割れ指数の解析結果を示す。現状のコンクリートの温度やひび割れ指数がリアルタイムで把握できることが分かる。また、例えば事前解析で想定したひび割れ指数よりも低下する可能性がある場合や外気温湿度の変動が大きくコンクリートの品質に影響を与える可能性がある場合など、現場の現状の状態を把握するだけでなく、コンクリートの養生などの対策を迅速に実施することが可能となる。図-5はコンクリート温度分布の表示画面を示す。現場事務所において現状のコンクリートの発熱状況を把握できることにより、現場職員や作業員の打込み後の養生や温度ひび割れ対策の必要性、品質向上への意識がより高まることも分かった。

図-6は橋脚のフーチング部において本システムによ

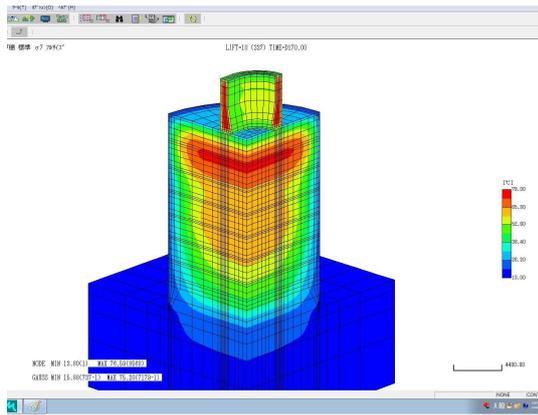


図-5 コンクリート温度分布の表示状況

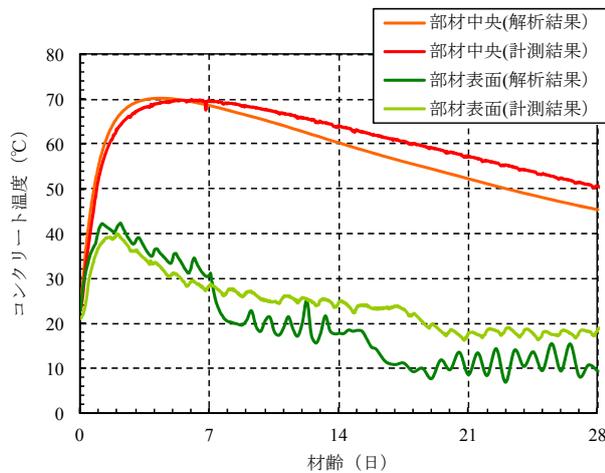


図-6 コンクリート温度の解析結果と計測結果

る解析結果の検証を目的として、部材断面の中央と表面部分のコンクリート温度の解析結果と計測結果との比較を示す。材齢7日の脱型以降は若干の違いがみられるが、計測結果と解析結果がおおよそ一致していることが分かる。精度向上には材齢7日の脱型以降のコンクリート表面における熱伝達条件の物性評価も必要であると考えられる。

4. まとめ

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紹介するとともに、本システムを現場適用した結果について示した。

打設管理システムでは、コンクリートの打込み状況を面的に、しかも連続的にリアルタイムで把握することができ、その画面を現場で見ることにより、実際に打込み作業、締固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。本システムでは、単にコンクリートの打込み状況を把握するだけでなく、打込み速度、打込みからの経過時間、コンクリート打設量などの数値情報を得られるため、これまで以上に合理的に施工管理が実施できるものと考えられる。

また、養生管理システムでは、現状のコンクリートの発熱状況、ひび割れ指数の低下状況をリアルタイムで把握できることにより、現場職員や作業員のコンクリート打込み後における養生や温度ひび割れ対策の必要性、品質向上への意識がより高まることも分かった。

今後は、本システムの建設現場での適用と検証を重ねるとともに、本システムの利便性向上、コンクリート施工の合理化や省力化を実現していく予定である。また、本システムの適用によるコンクリートの品質への影響についても検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 森岡弘道, 二宮純, 細田暁, 田村隆弘: 地方自治体におけるコンクリート構造物のチェックシートを活用した品質確保の取り組み, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1327-1332, 2013.7
- 2) 湯浅昇, 笠井芳夫: 非破壊による構造物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
- 3) 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
- 4) 藤倉裕介ほか: コンクリート打設状況の連続検知, ビジュアル化による品質管理手法の開発と適用事例, 土木学会第66回年次学術講演会概要集, CS9-019, pp.37-38, 2011.9
- 5) 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
- 6) 藤倉裕介: 静電容量の変化によるコンクリートの打込みから硬化、乾燥過程の水分量評価手法に関する基礎的検討, 第4回 コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, 「成熟社会におけるコンクリート構造物の非破壊検査の役割」論文集, pp.209-214, 2012.8
- 7) 橋田浩, 田中享二: 不透湿な仕上げ層を施工した後のコンクリートの含水状態(仕上げ下地としてのコンクリートの含水状態の検討・その2), 日本建築学会構造系論文報告集, No.419, pp.21-29, 1991.1