

# 報告 静電容量の変化によるコンクリートの打込みから硬化過程の水分量評価と施工時の品質管理手法に関する検討

藤倉 裕介\*1

**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。本研究では、高品質なコンクリート構造物を施工することを目的とし、型枠内に設置した計測センサーケーブルの静電容量の変化からコンクリートの打込み状況を把握し、リアルタイムでビジュアル的に表示することで打込み時の品質管理を行う手法について示すとともに、現場での適用事例を報告する。また、同一のセンサーを打込み後も継続的に用い硬化過程における圧縮強度や含水率の推定を行う手法について基礎的な検討を行い、セメントペーストを用いた場合では十分に適用できることを検証した。

**キーワード:** コンクリート打込み, 現場計測, ビジュアル化, 品質管理, 静電容量, 水分量, 圧縮強度

## 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。また、性能照査型設計への移行、技術提案型発注の増加、あるいは環境負荷低減の観点から、各種の混和材料を組み合わせる使用ケースが増加している。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事前に照査し、打込み、締固め、仕上げ、養生に至る施工サイクルを入念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。高品質なコンクリート構造物を施工するためには、まだ軟らかいフレッシュコンクリートを型枠の隅々に充填させ均一に締め固めることが重要であるが、コールドジョイントやジャンカといった不具合を多々生じる。また、仕上げ作業のタイミングや養生方法によっては、有害なひび割れを生じる。施工時の初期欠陥を生じた場合にはコンクリート構造物が早期に劣化することが指摘されており、その程度によっては施工者負担で補修が行われる。

上記のように施工によるコンクリートの不具合が生じる理由としては、施工条件や施工中のトラブル、品質管理上の問題によるものだけでなく、施工コストの削減や工期短縮の観点から一度に多量のコンクリートを扱うことが多く、品質管理の目が十分に届かないことや、近年の耐震基準改定から高密度に鉄筋が配置されているにも関わらず硬練りの配合が採用されていること、および構造形態が複雑でコンクリートの充填状況の目視確認が困難な部位を有する場合もあることなど、複数の要因がある。このように施工者には高度な施工管理が要求され

るとともに、合理的で経済的な施工計画を立案することが求められる。

コンクリート打込み時の品質を高めるとともに、その作業に従事する作業員の熟練度の影響を軽減する対策としては、自己充填型（高流動）コンクリートを採用することもその解決へ向けた一手段である。近年、高機能な混和剤が開発されるとともに学協会や発注機関の指針類も整備され、安定したフレッシュ性状を有する高流動コンクリートを適用できる環境が整いつつある。高流動コンクリートは、自己充填性が高いだけでなく、材料分離抵抗性も高くブリーディングもほとんど生じないため、コンクリートが均一に施工でき高品質なコンクリートとなる。しかしながら、配合の変更が困難な場合や普通コンクリートと比較するとコスト高となり、設計時から採用されるケースは非常に少ない現状にある。

一方、上記のようにコンクリート構造物の品質が施工の良し悪しに起因することから、施工による不具合を未然に防ぐことを目的とし、様々なセンシング機器や計測手法を補助的に導入することで施工管理を行う方法が古くから検討されている。これは、コンクリートの充填検知、温度計測、脱型強度管理、含水状態を把握するためのセンサーなど用途も多岐に渡り様々な手法が研究されている<sup>1), 2)</sup>。しかし、現状の方法の多くは高価な上に使用目的が多様であり計測機器の取扱いや設置にも手間がかかるため、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誰でもが見やすく、リアルタイムに結果を表示することが情報量の多さからも困難であり、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、本研究では高品質なコンクリート構造物を施工することを目的とし、型枠内に設置した計測センサーケーブルの静電容量の変化からコンクリ

\*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)

トの打込み状況を把握し、リアルタイムでビジュアル的に表示することで打込み時の品質管理を行うとともに、同一のセンサーを用いて硬化過程における強度や含水率の推定を行う手法について提案する。本報告では、提案手法の概要について示すとともに、現場での適用事例について示す。また、硬化過程における水分量の評価方法について、セメントペーストを用いた基礎的な検討を行い、その適用性について検証を行った。

## 2. 既往の計測技術

コンクリート施工時の品質管理において、現場計測を行い補助的にセンシング技術を適用した事例は多岐に渡る。ここでは、本研究と同様にコンクリートの打込み状況や硬化体中の内部の水分量を把握する目的で開発された既往のセンサーについてその一部を示す。

まず、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、光学的方法、赤外線を使用する方法や変位計を設置する等、非接触で行う方式と、電気的なセンサーを型枠に貼り付ける方法やコンクリート中に埋め込む方法などの接触方式が提案されている。コンクリート打込み状況の目視確認が困難な箇所や型枠への充填状況を施工中に確認する方法としては、後者の接触方式が採用され、各種センサーを型枠内に設置する手法が提案されている。例えば、印加電圧残留値を用いた手法<sup>3)</sup>や静電容量を用いた手法<sup>4)</sup>が電気的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ち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も多く、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。

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<sup>1)</sup>。例えば、セラミック素子を用いた研究<sup>1)</sup>では、配合条件が異なる場合の含水率を推定するな

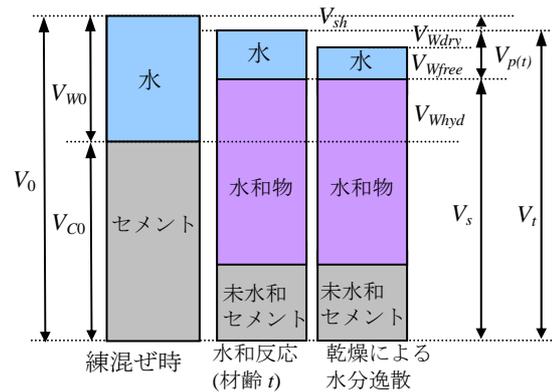


図-1 セメント硬化体における相組成の概念

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硬化体内部の含水状態を評価する事例<sup>5)</sup>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、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。

図-1 はセメント硬化体における相組成の概念を示す。練混ぜ時の全体の体積を  $V_0$ 、セメントの体積を  $V_{c0}$ 、水の体積を  $V_{w0}$  とおく。 $V_{w0}$  はセメントの水和反応による消費  $V_{whyd}$  あるいは脱型による乾燥  $V_{wdry}$  によって減少する。また、硬化収縮  $V_{sh}$  や乾燥収縮の影響による体積変化も生じる。硬化体中の含水率の指標である体積含水率は乾燥前の全体の体積  $V_t$  に対する自由水  $V_{wfree}$  の割合である。質量含水率として与えられる場合もあるが、乾燥前後で体積が大きく異なることを前提として体積  $V_t$  を評価しておくことが必要である。また、内部湿度計で計測される湿度は空隙中の飽和度であり、空隙の体積  $V_{p(t)}$  に対する自由水  $V_{wfree}$  の割合で表され、材齢とともに変化する固相部分の体積  $V_s$  と空隙の体積  $V_{p(t)}$  を十分に把握した上での評価が重要である。すなわち、図-1 に示すように水分量を練混ぜ時からの材齢に伴って変化する相組成の中での位置づけとして整理し、一貫して捉えることも重要であると考えられる。

## 3. 本手法の概要と適用事例

### 3.1 本手法の原理

本手法は、計測センサーケーブルを型枠内に設置し、型枠内に打ち込まれるコンクリートの充填に伴って変化する静電容量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とともに、その後も静電容量の変化を測定することで、図-1 に示すように硬化過程または乾燥による水分量の変化を把握しようとするものである。これにより打込み時の施工管理から脱型まで、

更には脱型後においてコンクリートの水分に関わる品質管理を一貫して実施しようとするものである。印加電圧方式を採用し打込みから水和過程まで継続してモニタリングを行った既往の研究<sup>3)</sup>と同様のコンセプトで品質管理を行う目的のものであるが、本手法では構造物内のばらつきを考慮して、点の情報ではなく面的に、また平均的に物性を捉えようとする点異なる。

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)、打ち込み完了後は1120(F)となる。すなわち、コンクリートの打ち込み高さや静電容量の関係を事前に調べておくことにより、コンクリートの打ち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<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、静電容量と打ち込み高さの関係はおおよそ比例関係になる<sup>6)</sup>。図-2(c)では硬化コンクリートの状態を示す。フレッシュ時とは異なり水分が減少して硬化体が形成されると静電容量は低下する。こ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が非常に小さいもの仮定すると、この低下量が消費、逸散により減少した水分量となるわけである。

### 3.2 システムの概要

写真-1には計測センサーケーブルを示す。計測センサーケーブルはコンクリート中に埋設するケーブル部分と計測結果を計測装置に無線で転送するタグ部分とで構成されている。ケーブル部分は打ち込み高さ8m程度までに対応可能な長さとしている。タグ部分は、厚さ1cmで4cm×4cm程度の大きさを有し、コンクリートの打ち込み高さよりも上面に出し計測終了後に回収し転送する。

次に、本手法を実際の建設現場のコンクリート打ち込み時において適用する場合のシステムの概要を図-3に示す。計測センサーケーブルを型枠内の鉄筋あるいは別途用意した鉄筋等に沿わせて鉛直に設置する。図-3に示すように計測ボックスで回収したデータは直ちに解析され、打ち込み高さを示すグラフや打ち込み状況をビジュアル化して表示する。また、計測結果の情報は、Wi-Fi機能を使って各種端末へ無線で転送することで、コンクリート打ち込み箇所から離れた場所でも計測状況を把握するこ

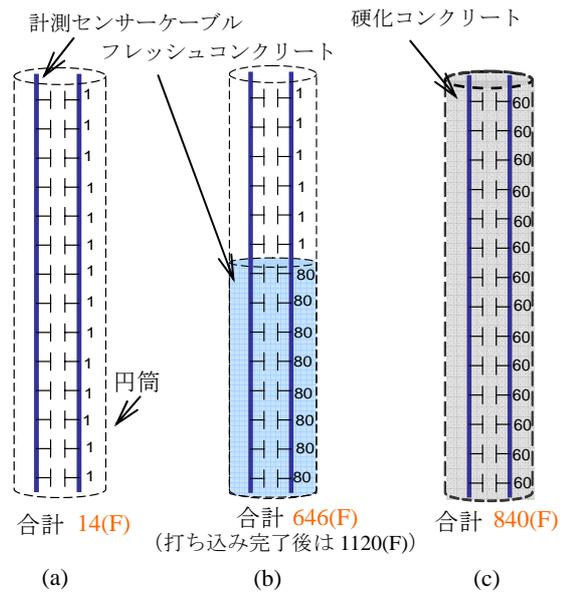


図-2 計測原理の概要



写真-1 計測センサーケーブル

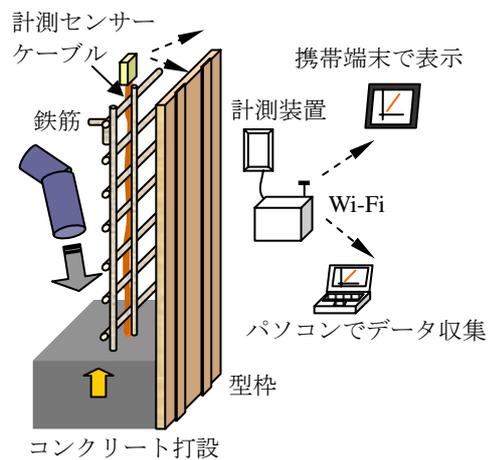


図-3 コンクリート打設時のシステム概要

とが可能である。表示ソフトの拡張性は高く、構造物の形状や用途に応じ、コンクリートの打設速度や打設量の把握、打ち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などの不具合を未然に防ぐことができるものとしている。

### 3.3 現場適用事例

コンクリート打ち込み時における現場での適用状況に

ついて示す。現在、既設橋脚の耐震補強工事、橋梁工事における柱の打込みやボックスカルバートの壁部分のコンクリート打込み時の品質管理に適用を行っている。写真-2には既設円柱橋脚のRC巻立て耐震補強工事への適用事例を示す。コンクリート打設箇所から離れた場所で携帯端末を使用して打込み高さを確認している状況を示す。表示画面は施工部位の半円部分の打上りの状況を示しており、平均打上り速度、打込みからの経過時間、施工の進捗を確認することで効率的に施工管理を実施した。

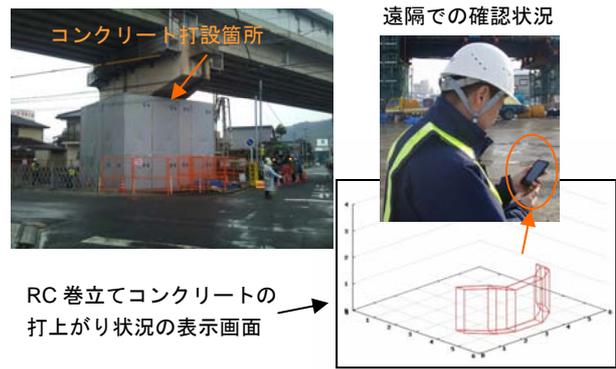


写真-2 遠隔での打込みの確認状況

#### 4. 硬化過程の水分量の計測に関する基礎的検討

##### 4.1 実験概要

フレッシュコンクリート打込み後の硬化過程において同一のセンサーを用いて継続して計測し、静電容量の変化から硬化中の水和反応や乾燥により減少する水分量を評価する手法について基礎的な検討を行った。まず、図-4(a)に示すように高さ 1m、幅 50mm、長さ 300mm の壁状の試験体を作製した。幅 50mm の壁の一面を所定の材齢にて脱型して気中に曝し乾燥面とし、センサーは乾燥面から 5、15、25、35mm の位置 (No.1~No.4) および 150mm の位置 (No.5) に設置した。計測線は 1.5m の長さを有し、そのうちの 1m が計測に有効な線とし、メッシュ状の鉄筋に沿わせて幅 50mm の断面中央付近に鉛直方向に設置した。No.1~No.4 のセンサーはセメントの水和反応および乾燥面からの水分逸散の影響を調べる目的で設置し、中央に設置した No.5 のセンサーは乾燥の影響を受けず水和のみによる影響を調べる目的で設置したものである。本システムによる計測は打込み開始から実施しているが、本項では硬化過程における検証を目的とするため、打込み完了後以降の計測結果を対象とした。

試験体は普通ポルトランドセメントを用い、W/C=50%にてモルタルミキサーで練混ぜたセメントペーストを上面より流し込み作製した。所定の高さ 1m まで数時間かけてゆっくりと流し込み、ブリーディング水を除去した後、高さ調整のためのペーストを打ち上面を均一に均した。更に硬化を待ち上面からの乾燥を防ぐ目的で塗料を塗布しアルミテープでシールした。試験体は 20°C、相対湿度 60%の恒温恒湿室で作製、養生を行い、乾燥面の乾燥開始材齢を 1日、7日とする 2 ケースを作製した。

次に、乾燥による水分逸散量を別途把握し、No.1~No.4 のセンサーで得られた結果と比較するため、図-4(b)に示すように 50mm×50mm×200mm の大きさの型枠を用い試験体を作製した。試験体は(a)と同条件で練り混ぜたセメントペーストを用い、乾燥面に対して同様に上方向から流し込み作製した。材齢 1日 で脱型し、その直後に速やかに湿式の cutter で 10mm ごとに切断し、周囲の

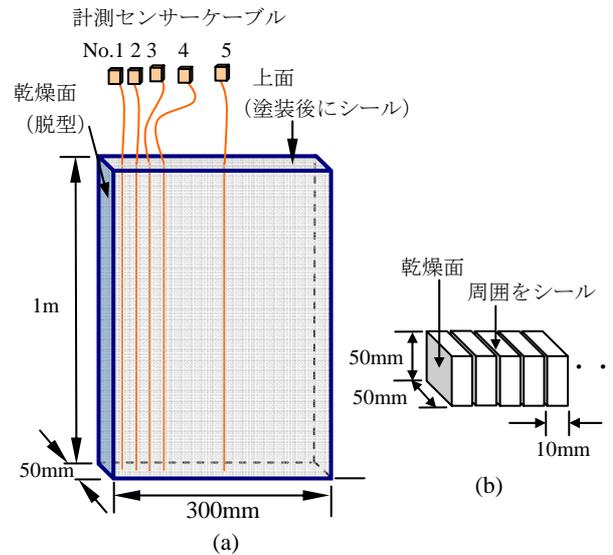


図-4 実験試験体の概要

水分を軽くぬぐった後に周囲に塗料を塗布しアルミテープでシールした。湿式 cutter による切断時の水分がその後の水和に影響を与えるものと考えられるが、シール後の質量を基準としてその後の質量変化を考えることとした。その後、乾燥面一面のみからの水分逸散となるように切断した試験体を重ね合わせ、テープで留めた後、ビニール袋で 2 重に包み込み養生した。試験体(a)と同様に材齢 1日 から乾燥させるケースでは、上記の作業後から乾燥を開始し、材齢 7日 から乾燥を開始するケースでは、所定材齢となるまで封緘養生とした。乾燥開始後、定期的に各片の乾燥開始材齢時の初期質量からの質量変化を測定した。また、同条件で作製したセメントペーストを用いて φ50mm、高さ 100mm の円柱試験体を作製し、材齢 1日 で脱型し封緘養生を行い、材齢 1日、3日、7日、28日にて圧縮強度を測定した。

##### 4.2 試験結果および考察

図-5には既往の水和反応モデル<sup>7)</sup>により算定した相組成を示す。相組成は実験と同様の配合条件、養生条件で求めたものである。図-5に示すようにセメントの水

和反応に伴って、自由水が減少することが分かる。次に、試験体(a)より得られた計測結果を図-6 および図-7 に示す。水分の割合は材齢に伴って変化する静電容量の値を打込み後の最大値との比で整理したものである。硬化体の静電容量はセメントや水和物などからなる硬化体の固相部分の静電容量の値を含むものと考えられるが、本報告では固相部分の静電容量に対する測定を行っていないため、計測される静電容量の変化は全て水分の変化によるものと仮定して整理した。すなわち、静電容量の変化を図-1 にて示すように練混ぜ時に与えられた水分  $V_{w0}$  に対する自由水  $V_{wfree}(=V_{w0}-V_{whyd}-V_{wdry})$  の割合と仮定して求めたものである。また、図中の凡例は各計測センサーケーブルの乾燥面からの距離を示す。また、相組成モデルとした図中のプロットは図-5 に示す相組成モデルから求めた練混ぜ時に与えられた水分  $V_{w0}$  に対する自由水  $V_{wfree}(=V_{w0}-V_{whyd}-V_{wdry})$  の割合を求めたものである。静電容量の変化については、未水和セメントや水和物で構成される固相部分の値を十分小さいものとして仮定して整理した結果ではあるが、理論的に求めた相組成モデルと割合変化の傾向としては一致する結果が得られていることが分かる。これは、今回の報告ではセメントペーストを用いた検討であり、図-5 に示すように硬化体に占める自由水の割合が大きく、固相部分の静電容量の影響を受けず、自由水部分に支配的であったためと想定される。コンクリートでは体積含水率は10%前後程度となるため、固相部分も含めた静電容量の評価が必要であるものと考えられる。また、図-6 に示すように乾燥面から最も近い5mmの距離に設置したセンサーの結果は、脱型後からの水分割合の変化が大きいのことが分かる。これは乾燥による自由水の減少量が多いことやそれに伴って変化する水和度との複合した結果によるものと考えられる。

図-8、9 は試験体(b)による試験結果を乾燥面からの距離ごとにプロットで示す。乾燥による水分割合は質量測定の結果から以下の方法で算定した。 $V_0$  を練混ぜ時の体積(ml),  $w_0$  を水セメント比(W/C), 水の密度を  $\rho_c$ (g/ml), セメントの密度を  $\rho_w$ (g/ml) とおくと、 $V_0$  に対する練り混ぜ時の水の質量  $M_{w0}$  は式(1)で求められる。

$$M_{w0} = V_0 \left/ \left( \frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho_c \cdot w_0} \right) \right. \quad (1)$$

ここで、 $\rho_w$  を 1(g/ml) とすれば、 $M_{w0} = V_{w0}$  とでき、ここでは水和や乾燥による体積変化を無視して考えれば、試験体(b)では一つの試験片より  $V_0$  を与えることで試験片ごとの  $M_{w0}(=V_{w0})$  を式(1)より定義できる。すなわち、乾燥による水分変化量  $M_{wdry}$  は乾燥前の質量と乾燥後に測定された質量の差であり、乾燥による水分割合の変化は  $1 - M_{wdry}/M_{w0}(=1 - V_{wdry}/V_{w0})$  となり、相組成の中の体

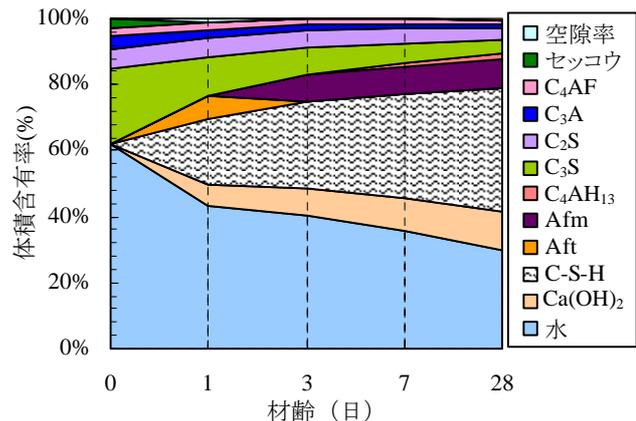


図-5 相組成モデル (W/C=50%, 20°C養生)

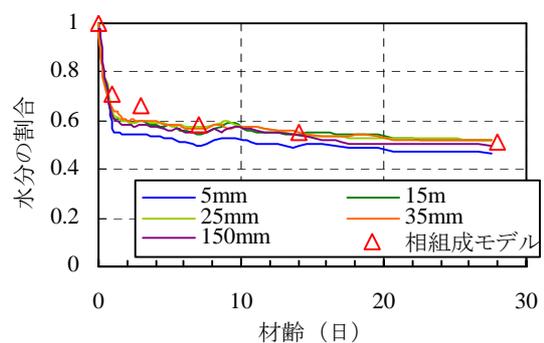


図-6 材齢と水分の割合変化の計測結果 (材齢1日にて脱型のケース)

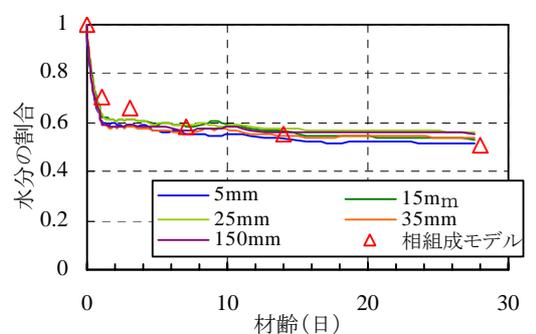


図-7 材齢と水分の割合変化の計測結果 (材齢7日にて脱型のケース)

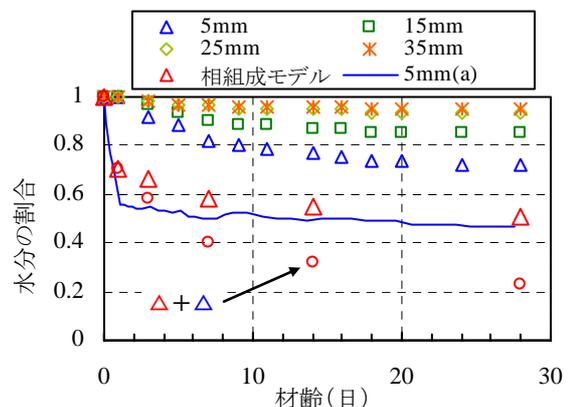


図-8 材齢と水分の割合変化 (材齢1日にて脱型)

積変化として図-6, 7と同様に整理される。

図-8, 9 中には試験体(a)による乾燥面からの深さ5mmの試験結果, 相組成モデルの結果, ならびに深さ5mmでの試験結果と相組成モデルからの算定値を足した値 ( $V_{w_{hyd}} + V_{w_{dry}}$ を想定)を示す。図-8より, 材齢1日で脱型した場合の計測結果では, 乾燥による水分の減少量も大きく,  $V_{w_{hyd}} + V_{w_{dry}}$ を想定した値は試験体(a)の結果を大きく下回っていることが分かる。試験体(a)における計測結果の妥当性の検証も重要であるが, 既往の検討<sup>7)</sup>において示すように, 乾燥により水和が阻害され, それにより水和による水分消費が低減した影響があるものと考えられる。これは, 表層部分の品質向上を考えれば重要な課題であるが, 乾燥後は部材内で常に水分移動を生じ, それに伴い水和反応の進行, 空隙構造の変化, 更には体積変化も生じる非平衡状態の事象を扱うものであり, 特に若材齢時では1つの要因を限定するような検証データの採取は困難である。そのため, 理論的なモデル化も重要であると考えられ, 水分移動や含水状態に依存した水和反応のモデル化と相組成の算定方法について今後更なる検討を進める必要がある。

図-10には図-7で示したセンサーNo.5の水分の割合変化から既往の水和反応モデル<sup>7)</sup>より水饱和度を求め, 水饱和度に相当する相組成から得られる空隙率より圧縮強度を推定<sup>8)</sup>した結果と円柱試験体による圧縮強度試験結果とを示したものである。圧縮強度についても十分に推定可能であることが分かる。

## 5. まとめ

本報告では, 型枠内に設置した計測センサーケーブルの静電容量の変化からコンクリートの打込み状況を把握し, ビジュアル化するシステムの概要を示すとともに, 同センサーの硬化過程における適用性について検討した。硬化過程における計測結果では, 静電容量の減少割合が水和による水分の消費および乾燥による逸散によるものと仮定して整理を行い, 既往の相組成モデルならびに実験結果と比較した。その結果, センサーによる計測結果は理論的な相組成モデルと比較して割合変化の傾向と一致する結果が得られることが分かった。また, 圧縮強度についても本手法により推定可能であることが分かった。

## 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
- 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

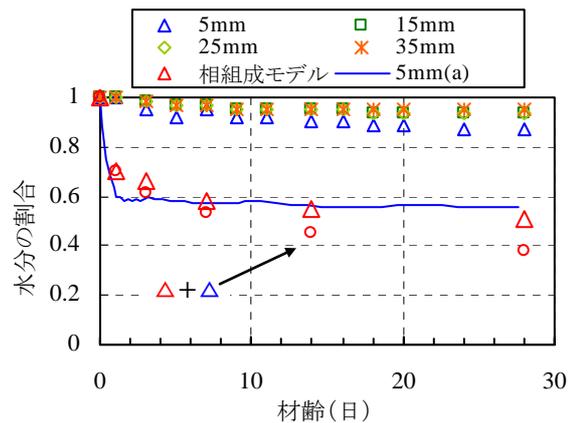


図-9 材齢と水分の割合変化 (材齢7日にて脱型)

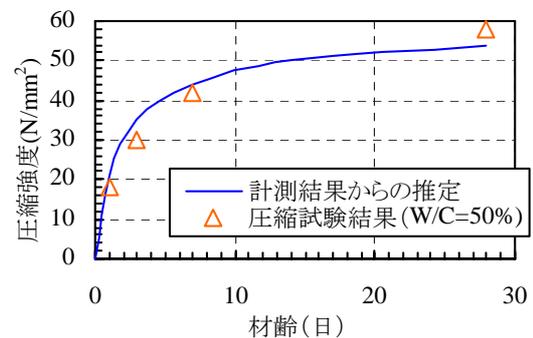


図-10 圧縮強度の推定結果

- 3) 平田隆祥, 十河茂幸: 電圧印加方式によるコンクリートの充填感知に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.69-74, 1996
- 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 藤倉裕介, 大下英吉: 任意湿度下の含水状態と反応過程を考慮したセメント硬化体の空隙構造形成モデル, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.2, pp.264-279, 2011
- 8) 藤倉裕介, 大下英吉: 空隙構造と含水状態に基づくセメント硬化体の体積変化機構のモデル化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.611-616, 2011