

コンクリートの打込みから硬化過程の水分量変化に基づく品質管理手法の提案

藤倉 裕介

概 要

施工者は施工時の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。特に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、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、コンクリート中の水分の分布や状態を把握することはコンクリートの物性を評価する上で重要な情報である。そこで、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に基づき、コンクリートの打込み状況から硬化過程ならびに脱型後の乾燥過程におけるコンクリート中の水分量をリアルタイムで評価できる手法を提案する。また、本提案手法の適用性を検証する目的で、セメント硬化体を用いた基礎的な実験による比較を行った。その結果、セメント硬化体の場合ではセメントの水和反応に消費される水分量の変化やそれに基づいて推定される圧縮強度、乾燥に伴って減少する水分量の評価ができることを確認した。

Evaluation of water content during hydration of concrete based on change in electrical capacity

Abstract

Contractors are required to select appropriate materials, and understand their effect on the performance of the concrete over time, including placeability, strength development, and long-term durability. Water content in the concrete influences not only workability of fresh concrete but also serves an important role in determining the properties of cement hydrates, drying shrinkage, and the progress of creep and durability. Therefore, understanding the distribution of water in concrete is important in evaluating the properties of concrete.

This report examines attempts to understand the properties of concrete based on change of electrical capacity for the purpose of high-quality and cost-effective concrete construction. To evaluate effectiveness of the proposed method, estimated results were compared with experimental results for water content and compressive strength using cement hydrate specimens. The results showed that the experimental and estimated results were in close agreement and estimated results effectively characterized the cement hydrates.

キーワード: コンクリート、打込み、現場計測、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。コンクリート構造物の品質向上のためには、使用材料であるコンクリートの力学性能、耐久性能といった時間軸で要求される性能を事前に照査することが重要である。特に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、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、コンクリート中の水分の分布や状態を把握することはコンクリートの物性を評価する上で重要な情報である。

そのような背景から、コンクリート中の水分を評価する計測手法が検討されている¹⁾。例えば、コンクリート打込み時において施工による不具合を未然に防ぐことを目的とし、水分の有無を捉えることでコンクリートの充填検知や含水状態を把握するための手法が検討されている^{1), 2)}。セラミック素子を用いた研究³⁾では、硬化過程における含水率を推定するなどの手法が報告されている。また、内部湿度計を用いることで硬化体内部の含水状態を評価する事例³⁾も報告されている。

しかしながら、既往の手法では小型のセンサーを用いているため、実際の構造物内の含水状態のばらつきを考えた場合、その評価が難しいのが現状である。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。また、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。

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ートの打込み状況をリアルタイムで把握し、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を提案し現場への適用を進めている⁴⁾。本報告では、同一のセンサーを継続的に用いることにより硬化過程における水分量の変化を捉え、含水率の推定を行う手法について提案するとともに、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結果について示す。

§2. 本手法の概要

2.1 本手法の原理

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の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、印加電圧の残留値を用いた手法⁵⁾や静電容量を用いた手法⁶⁾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が多く、現場での配線の取り回しに手間を要する。

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。

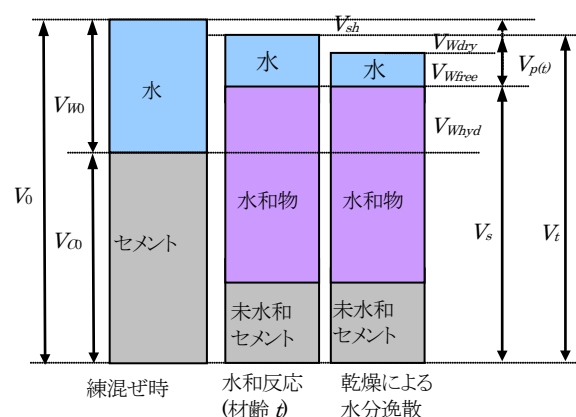


図 1 セメント硬化体の相組成の概念

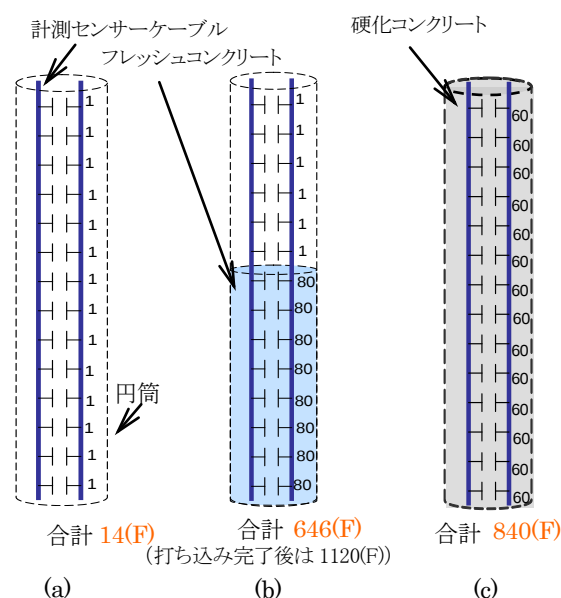


図 2 計測原理の概要

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 $V_p(d)$ 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 $V_p(d)$ 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。

本研究で提案する手法は、図 1 に示すようにフレッシュコンクリートの状態から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。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。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ものと考えられる。

2.2 システム概要

本手法を実際の建設現場のコンクリート打込み時に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 に示すように計測センサーとパソコンなどの端末は無線を介して行われる。回収したデータは直ちに解析され、打込み高さを示すグラフや打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 機能を使って携帯端末へ転送することができ、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。端末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。これにより、コンクリート打込み時の品質管理を実施するものである。写真 1 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がり状況を示しており、平均打上がり速度、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事例である。

§3. 水分量の計測に関する基礎的検討

3.1 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、本計測センサーケーブルを用いて計測し、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

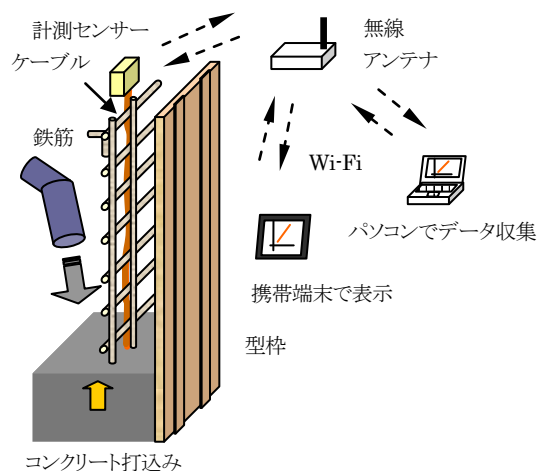


図 3 システム概要

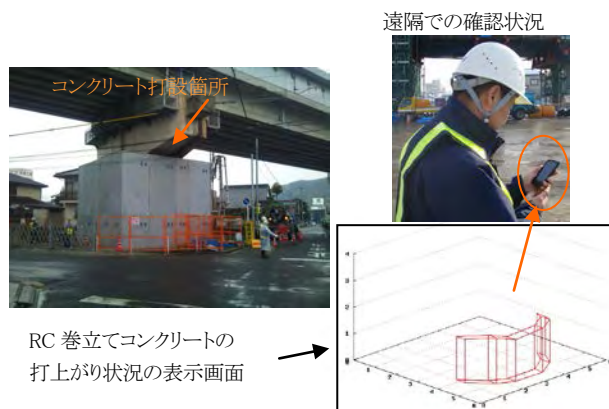


写真 1 遠隔での打込みの確認状況

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℃、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カッターで 10mm ごとに切断し、周囲の水分を軽く拭き取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。湿式カッター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、図 4 に示す乾燥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。

3.2 実験結果および考察

図 5 には著者らの提案するモデル⁷⁾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

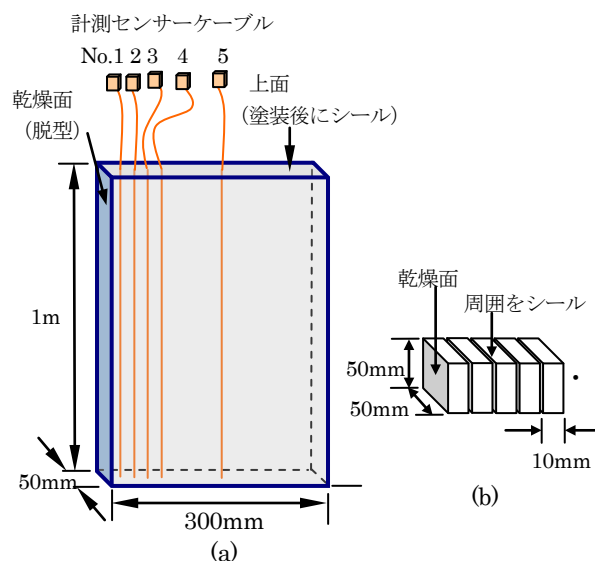


図 4 実験試験体の概要

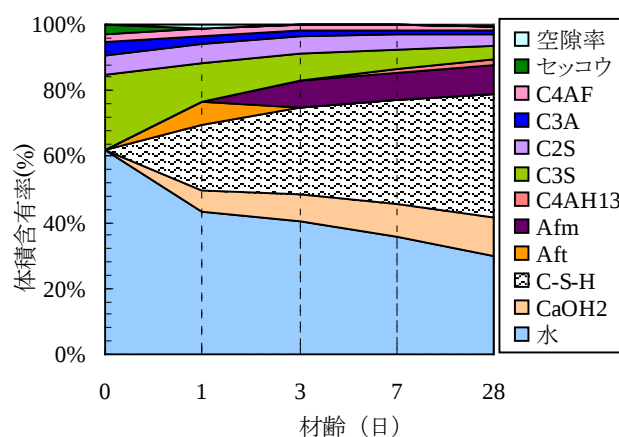


図 5 相組成モデル (W/C=50%, 20℃養生)

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。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と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 ρ_w (g/ml)、セメントの密度を ρ_c (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、 ρ_w を1(g/ml)とすれば、 $M_{w0} = V_{w0}$ であり、ここでは水と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 $M_{wd} (= V_{wd})$ を式(1)より定義できる。乾燥による水分変化量 M_{wdy} 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 $1 - M_{wdy} / M_{w0} (= 1 - V_{wdy} / V_{w0})$ となり、相組成の体積変化として図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($V_{whyd} + V_{wdy}$ 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、 $V_{whyd} + V_{wdy}$ 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⁷⁾において示すように、乾燥により水とが阻害され、それにより水と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、それに伴い水と反応の進行、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と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

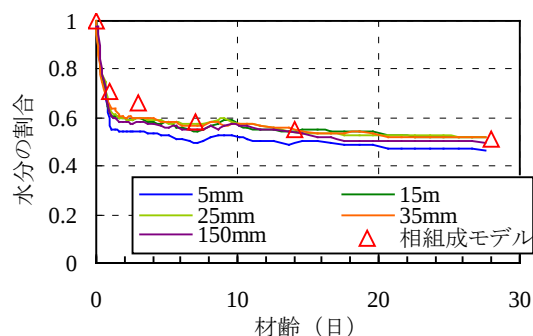


図6 材齢と水分の割合変化の計測結果
(材齢1日にて脱型のケース)

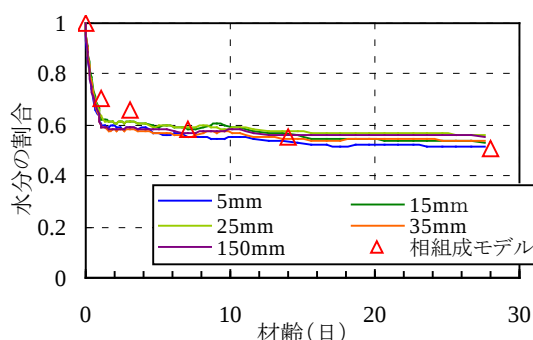


図7 材齢と水分の割合変化の計測結果
(材齢7日にて脱型のケース)

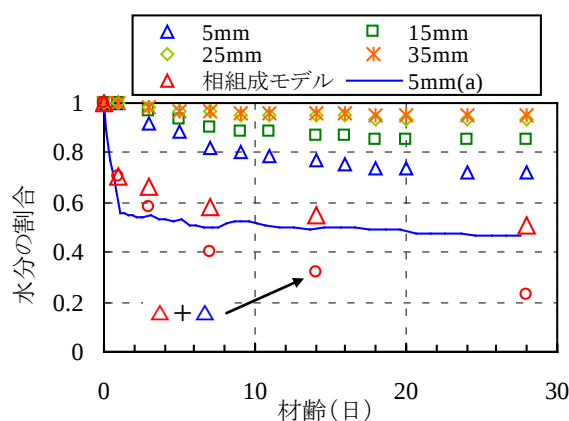


図8 材齢と水分の割合変化
(材齢1日にて脱型)

化から既往のモデル⁷⁾より水と度をおよび水と度に相当する相組成を求め、空隙率より推定する手法⁸⁾により圧縮強度を算定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。

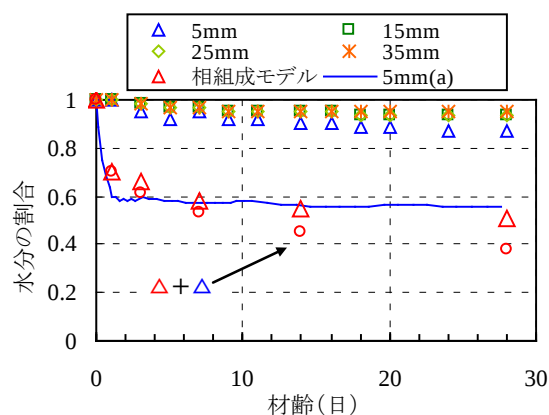


図 9 材齢と水分の割合変化(材齢 7 日にて脱型)

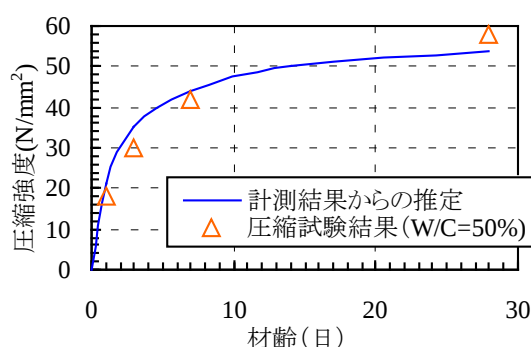


図 10 圧縮強度の推定結果と実測結果の比較

§4. おわりに

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、セメント硬化体においては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。今後は、実際の構造物における計測データを収集し、コンクリートの強度管理や耐久性の評価に応用していきたいと考える。

参考文献

- 1) 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

- 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) 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) 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
- 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
- 6) 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
- 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

ひとこと

提案型発注をはじめ、コンクリート構造物の高耐久化、高品質化に対する顧客のニーズは高い。高機能な材料や近年高度化する ICT 技術などを取り入れることで、コンクリート施工の合理化、省力化、高品質化が実現できるものとする。



藤倉 裕介