

# 総合的なコンクリート工事・品質管理システム

## センサ搭載型枠

野口 貴文・北垣 亮馬・西島 茂行

コンクリートの型枠存置期間中の管理は、工期短縮と長期耐久性に大きく関わるため、近年、ますます高いレベルの品質管理が要求されている。筆者らは、型枠の存置状況、使用回数、コンクリート表面の温度履歴といった情報を、搭載された無線ネットワークシステムを通じて収集し、さらに組み込みソフトウェアを使って養生中のコンクリート表面強度推定、可視化など品質管理を行うことのできる総合的なコンクリート品質管理システム（センサ搭載型枠）を開発した。現在、ダム・コンクリート工事現場ほか、さまざまな実現場に導入され始めており、その技術、利用方法、事例をわかりやすく紹介する。

キーワード：品質管理、小型集積回路、静電容量センサ、表面強度推定、コンパネとの比較、無線ネットワーク

### 1. はじめに

コンクリートの型枠存置期間は、工期短縮と構造物の品質確保に大きく関わるため、近年、ますます高いレベルの品質管理が要求されている。筆者らは、市場において成熟した既製の小型センサやチップと独自開発の専用センサをうまく組み合わせ、センサ付き小型集積回路を作製した上で、これを樹脂型枠あるいは鋼製型枠に設置することで、作業員に作業負荷をかけることなく、型枠の存置状況、使用回数、コンクリート表面の温度履歴などの情報を、無線ネットワークを通じて収集し、組み込みソフトウェアを使って養生中のコンクリート表面強度推定、可視化などを通じて品質管理を行うことのできる総合的なコンクリート品質管理システムセンサ搭載型枠を開発した。

電子情報を利用してコンクリートの品質管理を行う手法としてはRFIDを埋込むなどの事例<sup>1)</sup>があるが、センサ搭載型枠は、コンクリートにICタグなどの小型チップを混入するのではなく、樹脂型枠に、マイコンモジュールを組み込み、このマイコン上に様々な機能を有するアプリケーションをインストールしている。すなわち、スマートフォンに組み込まれたアプリのように、コンクリートが打込まれて型枠に触れると、樹脂型枠に組み込まれたアプリが起動し、打込み日時が記録され、温度測定が開始され、コンクリート表面強度推定を実施する。図-1に示すように、ハンディなリーディング・コンピュータ(スマートリーダー)は、

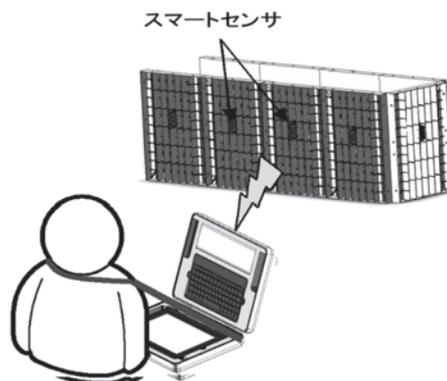


図-1 センサ搭載型枠のデータ収集のしくみ（無線ネットワークを通じて収集）

無線ネットワークを通じて各型枠と通信してデータを取り込むと、適切な脱型判断に対する適切な情報を与えてくれる。センサ搭載型枠は、さらなるコストダウンと高品質化が求められているコンクリート工事を効率化するための総合品質管理が可能なプラットフォームなのである。実際に、ダム・コンクリート工事への試験導入をはじめ、さまざまなコンクリート構造物への実導入が進められている。

表-1にセンサ搭載型枠の機能および仕様の概要を、表-2に合板型枠との性能の比較結果を示す。センサ搭載型枠は型枠工事時間が短縮されるなどの利点が多く、平米施工単価はトータルコストでコンパネ施工時と同等価格帯を目指すことから、樹脂型枠とセンサ搭載型枠をセットしたレンタル方式を採用している。これは、マイコン搭載多機能センサを採用した事

表-1 センサ搭載型枠の機能および仕様

機能・仕様	内容
コンクリート打込み時刻の計測・記録	コンクリートの打込まれた年月日時刻を自動判断して計測・記録
外気温度の測定・記録	型枠外側の温度を測定・記録
コンクリート表面温度の測定・記録	打込まれたコンクリートの表面温度を測定・記録
型枠存置期間の記録	型枠の存置された期間・方向を自動記録（柱、梁、壁、床ごとに存置状態を検知）
無線通信機能	データリーダー用コンピュータとの無線通信（データやコマンドの送受信） 15～20mの通信範囲（リーダーコンピュータまたは中継ターミナルとの通信距離）
バッテリー寿命	7～10年程度
稼働可能温度域	-10～80℃

表-2 センサ搭載型枠の性能と合板型枠との比較

項目	センサ搭載型枠	従来の合板型枠
質量 (600 mm × 1800 mm)	10 kg (ハンドリングに優れる)	12 kg
光透過性	光を透過し、打ち込み位置がわかる 昼間は内部が明るく作業しやすい	なし
施工速度	○早い	-
コスト	○削減可能	-
使用1回あたりのCO <sub>2</sub> (kg/枚)	9.62 (使い回しにより相当量が削減可能)	12.62
使用回数	50～100回 (200回以上使用実績あり)	5回程度
構造物建設時のCO <sub>2</sub>	小さい	大きい
型枠の寸法安定性	使用中の変形が少ない	使用中の変形や破損が大きい
コンクリートの品質管理	強度推定プログラムにより適切な脱型時期を判断	コンクリート供試体の強度による管理
データ収集	コンクリートの打込みと同時に、温度、方向、静電容量をデータ収集	なし
リサイクル性	回収し、再生樹脂型枠にリサイクル可能	燃料として利用

で、樹脂型枠のトレーサビリティが自動管理可能となり、レンタルシステムによる提供が可能になり、ユーザーにとってのコストメリットが大幅に高くなったためである。今後の普及をめざし、さまざまなコンクリート工事現場において、ユーザビリティの検証を行なっている。

## 2. 有効材齢による強度推定

センサ搭載型枠では、コンクリートの表面強度推定を行うことで脱型時期の判断が自動でできるようになっている。コンクリート工事において、コンクリートの強度推定は工期と品質に大きく関わる要因となるために、センサ搭載型枠の機能のうちでもっとも高精度で有益でなければならない。強度推定にはセメントの水和反応の程度が大きく関わってくるが、化学反応であるため、反応速度には温度依存性がある。例えば、温度が上がれば反応速度が速くなるため、異なる温度域で一定期間養生したコンクリートでは、強度発現性が異なり、低い温度域で養生されたコンクリートが高い温度域で養生されたコンクリートの強度に達するためには、より長く養生しなければならない。このような考え方から、温度・時間の積と圧縮強度の関係が一

意に決まる、という基本的な考え方のもと、積算温度が強度推定や品質管理に用いられてきた。しかしながら、そもそも、化学反応における反応速度と反応温度の定量的な関係は、「アレニウス則」に基づくアレニウス・プロットにより整理することができ、この反応則が熱力学における化学ポテンシャルの考え方に一致していることから、近年では、国際的にも多くの分野において、積算温度よりもアレニウス則に基づいた整理方法の方がより一般的に用いられている。コンクリートにおける有効材齢とは、このようなアレニウスの反応則を用い、反応速度の温度依存性を材齢に組込んだものである。すなわち、コンクリート20℃のときの反応速度を基準反応速度、活性化エネルギーを33 [kJ/mol]<sup>2)</sup>とし、絶対温度を用いることで下式のように表せる。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right]$$

$$f_c(t_e) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{(t_e - s_f) / t_0} \right)^{1/2} \right] \right\} f_{c28}$$

- $f_c(t_e)$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $t_e$  : コンクリートの有効材齢 (日)
- $t_0$  : 1 (日)
- $T_0$  : 1 (°C)
- $f_{c28}$  : コンクリートの 28 日圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $s$  : セメント種類に関わる定数
- $s_f$  : 硬化原点のための補正項 (日)

積算温度もアレニウス則に基づいて式変形すると、反応速度の自然対数の逆数を積分したものに比例するので、圧縮強度と一意の関係をもつことは明らかであるが、アレニウス則から整理された有効材齢の方が、例えばセメント種類や混和材種類など、材料の特徴ごとに係数の値を変えるだけで、ほとんどのコンクリートにおいて、同じ式が利用できるように一般化されている。また、その係数についても、遅延・促進作用といった化学反応上の意味付けをしやすい柔軟性が高い。加えて、20°Cで養生した場合の何日に相当するかを示しているの、感覚的に数値の意味を理解しやすい。実際に、コンクリートの力学特性に関わる研究論文でも国内外問わず広く利用され、国際コンクリート工学連盟(旧 CEB-FIP, 現 fib)が、品質管理のためのコンクリートの強度推定式として採用している<sup>3)</sup>ほか、2002年には、土木学会・コンクリート標準示方書・構造性能照査編においても用いられるようになっていた。我が国の土木構造物の建設現場での導入はまだ一般的ではないかもしれないが、国際的な趨勢を見回しても、今後、普及していくものと考えられる。

センサ搭載型枠のアプリケーションは、有効材齢および積算温度の両方の品質管理に対応であるが、多様なコンクリートに対応しやすい汎用性から、有効材齢による強度推定を標準設定にしてある。

図-2はコンクリート構造物を想定し、現場封緘養生された供試体の圧縮強度、コンクリート構造物の

内部に埋め込んだ供試体の圧縮強度、センサ搭載型枠の温度測定によって有効材齢に基づいて求められた推定圧縮強度の比較結果である。コンクリート構造物の寸法の影響により、現場養生であっても供試体と実構造物では温度履歴が大きく異なる可能性がある。センサ搭載型枠によって測定されたコンクリート表面温度データから有効材齢により求めた推定強度は、現場養生供試体よりも、より実構造物の表面近傍のコンクリートで発現する強度に近いことがわかる。

### 3. 構造物全体の『面』管理

前節に示したように、センサ搭載型枠では、有効材齢に基づき、型枠一枚一枚に接したコンクリート表面の強度推定が可能である。しかし、現場ではセンサ搭載型枠が何十枚、何百枚と同時に使われることになるため、これらすべての型枠に接したコンクリートを効率的に管理する仕組みが必要である。センサ搭載型枠では、個々の型枠に搭載されたセンサと無線ネットワークシステムを用いて通信しあうことのできるセンサリーダーというタブレット型のコンピュータを用意している。ユーザーはそれを現場で持ち歩き、個々の型枠に搭載されたセンサと通信して情報を収集し、収集した温度履歴から各型枠に接したコンクリート表面の強度を推定し、予め用意した型枠割付図に各位置のコンクリート表面の推定強度をカラー分布表示するほか(図-3左)、得られた表面推定強度の最大値、最小値、平均値を整理してグラフ化して表示してくれる機能を有している(図-3右)。

このような『面』の管理は、それを必要とする複数のコンクリート擁壁や橋梁工事現場への実導入やダム・コンクリート現場へ試験導入されており、検証が進められている(図-4)。

一般に、冬期工事においては、気温が極めて低い中

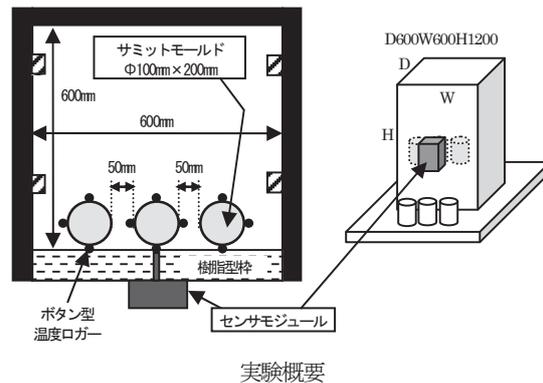
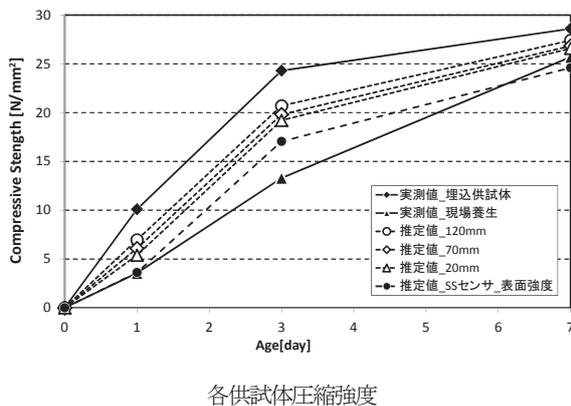
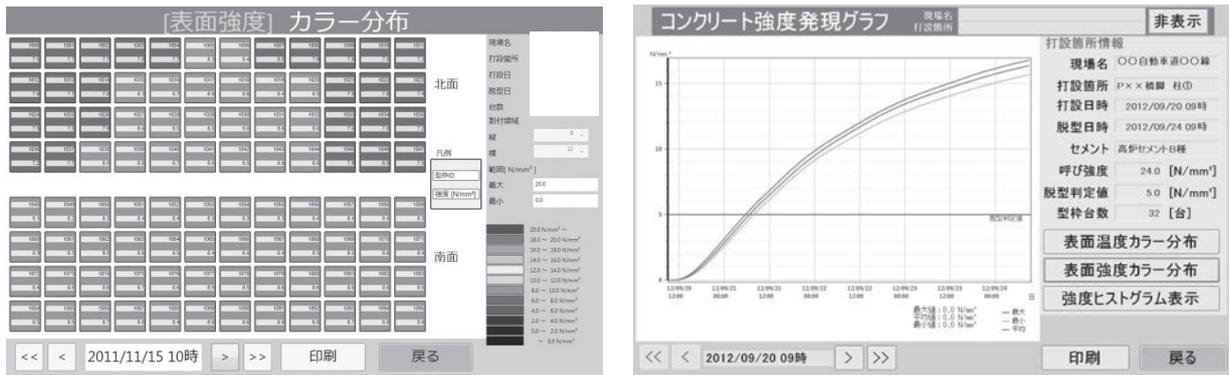


図-2 供試体とセンサ搭載型枠の表面推定強度の比較



図一三 養生中のあるコンクリート壁の表面の推定強度分布



図一四 ダム・コンクリート工事現場へのセンサ搭載型枠の試験導入事例

でコンクリート工事を行うことが少なくない。こうした場合には、風および日射の影響や構造物の形状によって、コンクリートの硬化に必要な温度を大きく下回る懸念のある箇所が生じるケースがある。この場合、ジェットヒーターなどの加温装置や、保温を助ける機能を有した養生シートなどを施す対策をとるが、センサ搭載型枠では、コンクリートの打込み後の周辺気温およびコンクリート表面の温度、推定強度が得られるため、可視化ソフトウェア上で、どの箇所の温度が低いのか、どの強度が出ていないか、といったことをビジュアルに確認できる。

これまで、品質管理目的でこういった面的な温度計測をする際には、熱電対の設置に多大な労力を要することから、設置数に限りがあるのが一般的であった。その場合には、端部や日陰部など、十分な注意を払う必要があると考えられるところへの設置が計画されるべきであるが、温度そのものが周辺環境に左右されやすい性質である以上、意外な箇所でも温度が低くなる、といったことが起こりうる。また、加温・保温を助ける装置や処理についても、型枠が存置され続けたり、狭い足場周りであったりするときには、期待する効果が得られているのか確認することすら難しいことも多い。その点、センサ搭載型枠を利用することで、人のアクセスが困難な箇所であっても、従来の合板型枠

工法とほぼ同等の低価格で外気温測定、コンクリート表面温度測定、表面強度推定を同時に行うことができるために、どの場所の温度が低いのか、保温処理は本当に効いているのか、すぐに確認することが出来る。

例えば、図一三においても、北面隅部の型枠においては、周辺温度があがらないために、コンクリートの強度が発現しにくい傾向にあることがよくわかる。実際、センサ搭載型枠を導入した現場で、ジェットヒーターの導入による加温効果の検証を行うなど、品質管理の改善に向けた重要な検討も行われ始めている。

また、従来は、技術検証・研究目的で、綿密な温度分布を調べるためには、多数の熱電対の設置と配線に、相当な時間と人員を割かなければならなかった。さらに、熱電対の断線のリスク、熱電対の接続先であるデータロガーの使用温度域の制約（通常、0～50℃範囲外では測定異常がでることが多い）など、測定において不安定要素が多いことも否定出来ない。一方、センサ搭載型枠では、型枠に取り付けられたセンサを用い、無線ネットワークを通じてデータを収集するため、こうした心配がなく、またセンサそのものの使用温度域も、-10～80℃程度までと、熱電対とデータロガーの組合せよりも測定可能温度域が広いため、より安定で効率的な測定が行える。

#### 4. 環境負荷低減

コンクリートの打込みに用いられる合板型枠は、現場で数回の繰返し使用后、最終的には焼却処分される。木材は、使用后どこかで焼却されたとしても、また別のどこかで、新たな木材が成長して炭素固定をしているはずだという観点にもとづいて、合板型枠は地球規模で見た時のCO<sub>2</sub>収支がゼロに近くなる「カーボン・ニュートラル」な材料である、という概念が普及している。しかしながら、現状のように森林面積が地球規模で一方的に減少する状況では、木材は、実質的には、カーボン・ニュートラルな材料ではない。近年では、この考えを修正し、地球規模のCO<sub>2</sub>収支を検討した上で木材のCO<sub>2</sub>排出量が計算されなければならない、という議論がなされ始めているが、建設業界においては、まだまだ、「木材を使えばCO<sub>2</sub>排出量を考慮する必要はない」といった旧来の解釈が通底している。

このような合板型枠に替わり、1990年代に樹脂型枠が開発され、すでに実投入されている。樹脂型枠は、合板型枠に比べて、製造時のCO<sub>2</sub>削減量が大いことから、転用回数を稼ぐことで使用一回あたりのCO<sub>2</sub>排出量において、合板型枠よりも低くなることを目指している。表—2に示すように、センサ搭載型枠における使用一回あたりのCO<sub>2</sub>排出量が、合板型枠よりも25%程度低くなるのはこのためであるが、使用回数が、合板型枠の10倍以上となるため、建設現場における型枠由来の廃棄物も十分の一以下に削減できると思われる。

#### 5. おわりに・コンクリート工事のさらなる効率化に向けて。特に断熱仕様版の導入開始

センサ搭載型枠は、現在、多くの建設現場で利用され始めている。施工者がセンサ搭載型枠を利用する理由には、環境の不安定な場所のコンクリート工事を、大幅に効率化させる可能性があることを期待されているケースが多いと聞く。特に、複雑な形状を有する構造物の冬期のコンクリート工事では、日射、風向き、風速など、品質管理を行う上で考慮すべき重要な因子が多くあるため、極めて注意深く養生することが求められるが、先に示したように、ジェットヒーター、保温シートなどを対処療法的に施す程度のことを行っているのが現状である。

今冬、我々は、センサ搭載型枠に、独自仕様の断熱加工を施した断熱養生仕様版を試験施工中である（図



図—5 現在開発中のセンサ搭載型枠・断熱仕様版

—5)。断熱仕様とすることで、コンクリートの水和熱を保温に積極的に利用でき、コンクリートの初期養生の安定化にも役立つ。断熱効果を評価する際にセンサ搭載型枠に搭載された温度センサがそのまま利用できるため、ただ単に断熱養生できるのではなく、どのくらいの保温養生ができてきているかを、リアルタイムで監視・評価したり、自動記録されたデータから知ることも可能である。

このように、センサ搭載型枠は、コンクリート工事における品質管理の重要なプラットフォームとして、多くの現場のニーズを踏まえながら、これからも機能を柔軟に追加し、進化していく予定であり、コンクリート構造物の高性能化・高品質化に向けて、よりいっそう品質管理の合理化・高度化に貢献できるシステムとなるべく検討を続けていく所存である。

JICMA

#### 【参考文献】

- 1) 杉山ほか：コンクリート中に埋め込んだ各種ICタグの通信性に関する研究、日本建築学会技術報告集 第15巻、第29号、pp.9-14、2009
- 2) fib 編：Constitutive modelling of high strength/high performance concrete, p.103、2008
- 3) CEB-FIP Model Code 1990

#### 【筆者紹介】

野口 貴文 (のぐち たかふみ)  
東京大学大学院  
工学系研究科  
准教授



北垣 亮馬 (きたがき りょうま)  
東京大学大学院  
工学系研究科  
講師



西島 茂行 (にしじま しげゆき)  
児玉(株)  
エンジニアリング事業部  
事業部長

