

スマートセンサ型枠を用いた 橋脚コンクリート工事・品質管理システム

野口 貴文・北垣 亮馬・西島 茂行

コンクリート工事における型枠取外し時期は、工期短縮を図ろうとするなかで、コンクリート構造物の長期耐久性の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、コンクリート表面の温度履歴、型枠の存置期間・転用回数といった情報を、型枠に搭載されたセンサを通じて計測し、無線ネットワークシステムを通じて収集した後、構造物各部のコンクリート表面の強度を、組込みソフトウェアを使って推定し、図面上にマッピングして管理することのできる総合的なコンクリート品質管理システム（スマートセンサ型枠（SSK）システム）を開発した。現在、SSKシステムは様々な工事現場に導入され始めており、本稿では、橋脚工事に適用した事例を報告する。

キーワード：品質管理，断熱養生，無線ネットワーク

1. はじめに

コンクリート工事における型枠取外し時期は、工期短縮を図ろうとするなかで、コンクリート構造物の長期耐久性の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、小型センサやICチップの市場において技術的に成熟した既製品と独自開発の専用センサを組み合わせ、センサ付き小型集積回路を作製した上で、これを樹脂型枠または鋼製型枠に搭載することで、作業員に負担をかけることなく、コンクリート表面の温度履歴や型枠の存置期間・転用回数といった情報を、型枠に搭載されたセンサを通じて計測し、無線ネットワークシステムを通じて収集した後、組込みソフトウェアを使って構造物各部のコンクリート表面の強度を推定し、図面上にマッピングして管理することのできる総合的なコンクリート品質管理システム（スマートセンサ型枠（SSK）システム）を開発した。

既報¹⁾にて報告の通り、本システムには、型枠内にコンクリートが打ち込まれると、打込み日時が記録され、型枠に接したコンクリートの温度測定を開始して、コンクリート表面の強度を推定するシステムアプリケーションが組み込まれている。また、図-1に示すように、ユーザーが携帯型の読取り用コンピュータ（スマートリーダー）を使い、無線ネットワークを介して各型枠と通信することで、足場に登ることなく、設置された複数の型枠から各種データを一括して

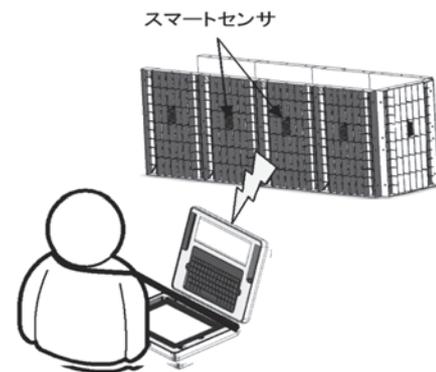


図-1 SSKシステムのデータ収集のしくみ(無線ネットワークを通じた収集)

取り込むことができる。このように、コンクリート工事において、SSKシステムを利用することにより、高いレベルの品質管理を高効率に行うことができる。

表-1にSSKシステムの機能および仕様の概要を、表-2に性能に関する合板型枠との比較を示す。SSKシステムでは、型枠工事期間が合板を用いる場合よりも短縮されるという利点を活かし、平米施工単価およびトータルコストを、合板を用いる場合と同等とすることを目指すことから、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ことで、樹脂型枠のトレーサビリティの自動管理が可能となり、レンタル方式の方がユーザーのコストメリットを大幅に大きくすることができたからである。現在、SSKシステムの今後の普及を目指して、様々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が、本稿では、SSKシステムを橋

表一 1 SSK システムの機能および仕様

機能・使用	内容
コンクリート打込み時刻の記録	コンクリートが打ち込まれた時を自動判断して年月日時刻までを自動記録する。
外気温度の測定	型枠外側の温度を測定する。
コンクリート表面温度の測定	打ち込まれたコンクリートの表面温度を測定する。
型枠の方向・傾きの記録	型枠の方向や傾きを記録する（柱・壁の側面部、梁・スラブの下面部など、型枠の存置状態の詳細な把握）。
無線通信機能	データリーダー用コンピュータと無線通信により、データやコマンドの送受信を行う。
無線通信範囲	15～20 m（センサと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）であるが、中継ターミナルを介すれば、さらに遠方まで通信可能となる。
バッテリー寿命	一般環境下では、7～10 年程度である。
稼働可能温度域	-10～80℃である。

表一 2 スマートセンサを搭載した樹脂型枠と合板型枠との性能の比較

項目	スマートセンサ型枠	従来の合板型枠
重量 (600 × 1800 mm)	10 kg (ハンドリングに優れる)	12 kg
光透過性	光を透過するため、コンクリートの打込み状況がわかる 昼間は内部が明るく作業しやすい	なし
施工速度	○速い	-
コスト	○削減可能	-
使用 1 回あたりの CO ₂ (kg / 枚)	9.62 (転用回数を増やすことにより相当量が削減可能)	12.62
転用可能回数	50～100 回 (200 回以上の転用実績あり)	5 回程度
型枠の寸法安定性	使用中の変形が少ない	使用中の変形が大きく破損が多い
脱型時期の管理	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試験による管理
データ収集	型枠の方向・傾き、静電容量、温度（コンクリート打込み後）のデータを収集	なし
リサイクル性	回収し、再生樹脂型枠としてマテリアルリサイクル	燃料としてサーマルリサイクル

脚のコンクリート工事に試行的に適用した検証実験の結果について報告する。

2. 橋脚コンクリート工事での試行実験

(1) 概要

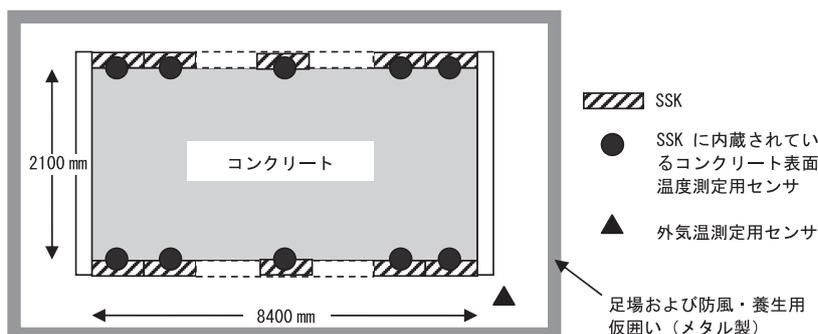
コンクリート工事に関する情報を表一 3 に示す。また、型枠の諸条件および設置状況をそれぞれ表一 4 および図一 2 に、工事現場における SSK の設置状況の写真を図一 3 に示す。今回のコンクリート工事は、東北

表一 3 工事情報

場所	宮城県多賀城市
工期	平成 24 年 3 月 1 日～平成 25 年 3 月 29 日
内容	橋梁下部のコンクリート工事

表一 4 型枠の諸条件

せき板の樹脂の種類、厚さ	ガラス繊維補強ポリプロピレン、5 mm
熱伝達率 (W/m ² ℃)	1.4
適用箇所	底盤部の東西南面および橋脚の直線部



図一 2 断熱仕様 SSK の設置状況 (断面図)



図-3 工事現場におけるSSK設置状況

表-5 コンクリート (24-8-20BB) の情報

	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	打込み日	打込み温度 (℃)	断熱温度上昇量 (℃)
底盤部	307	158	1月18日	9.0	52.8
橋脚部	305	155	2月2日	11.0	52.3

地方における冬季施工であったため、SSKの外側に発泡樹脂断熱材をセットした断熱仕様SSKを用いることとし、底盤および橋脚の側面に実験的に適用した。また、周囲に防風・安全対策用の金属製の仮囲いを設け、その内側に足場を設置した。表-5にコンクリートの配合、打込み温度、および文献2)に基づいて求めた断熱温度上昇量の推定値を示す。SSKの存置期間は、底盤部で1週間、橋脚部で2週間とし、その間の型枠に接するコンクリート表面の温度および仮囲いと構造物との間の外気温を1回/時間の頻度で記録し続けた。

(2) 実測結果および解析結果

コンクリート表面および外気温の実測値と断熱仕様SSKの熱物性データから文献2)により求めたコンクリート表面温度の解析値を表-6および図-4に示す。また、橋脚工事に於いて2月10日以降の数日間、

表-6 コンクリート表面の温度の最大値とその時の材齢

箇所	実測値	解析結果
底盤・南面中央	39.3℃, 材齢2.83日	38.3℃, 材齢4.0日
橋脚・南面中央	47.0℃, 材齢2.88日	46.9℃, 材齢5.5日

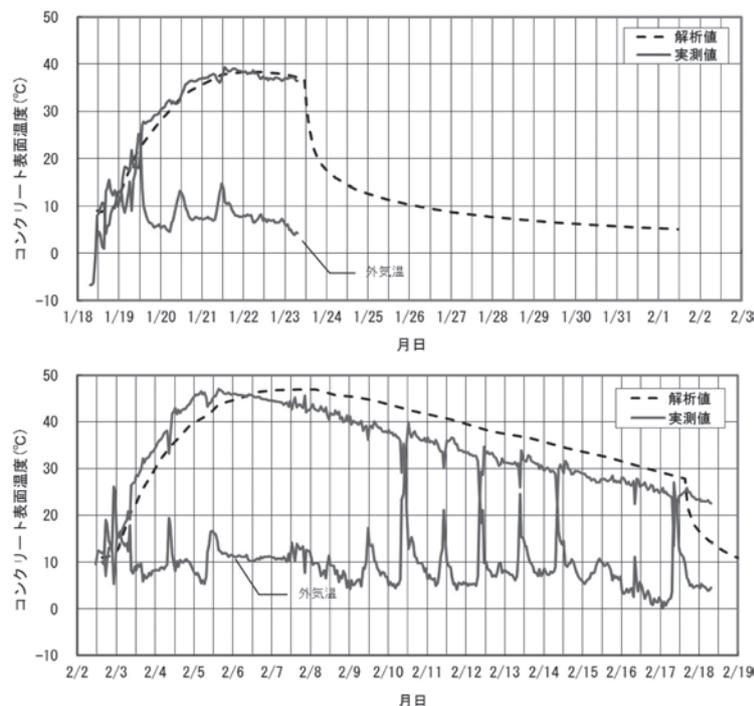


図-4 断熱仕様SSKにおけるコンクリート表面温度および外気温の実測結果 (上:底盤, 下:橋脚)

昼間に外気温が著しく上昇しているが、これは、この期間中は日照時間が長く、金属製の仮囲いが暖められた結果、外気温が上昇したものと考えられる。

既報¹⁾における適用実験では、無線通信を阻害する要因がない開放的な場所での測定およびデータ取得であったが、本実験のように、地形や周辺の仮設物による影響が懸念される橋脚コンクリート工事においても問題なく、遠隔地からSSKシステムを制御でき、各種データを測定・収集することができた。

また、コンクリート表面の温度については、実測値と解析値が概ね同じ傾向を示す結果となった。ただし、実測値の方が解析値に比べて最高温度はやや下回り、昇温速度はやや大きくなった。また、橋脚部の方が底盤部に比べてコンクリート表面と外気温との温度差が大きくなった。これは、底盤部および橋脚部における外気温として橋脚部の足元周辺で測定した温度を共通して用いたためであり、橋脚部における実際の外気温とは異なっていた可能性があると考えられる。

また、橋脚部における温度低下速度に着目すると、外気温が $-5 \sim 20^{\circ}\text{C}$ と極めて大きな範囲で日変動する中、材齢14日であっても、コンクリート表面の温度は約 28°C 以上あり、断熱仕様SSKの保温効果は極めて高いことがわかった。

3. おわりに

本稿では、断熱仕様SSKの橋脚工事への導入実験を行い、橋脚工事におけるその適用性と保温効果について検討した結果を報告した。

地形の複雑な場所における橋脚のコンクリート工事であっても、無線通信によるSSKシステムの制御に問題はなく、SSKシステムの汎用性を確認することができた。

また、複雑な形状を有する構造物の冬季におけるコンクリート工事では、日射、風向き、風速など、コンクリート構造物の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、極めて注意深い養生を施すことが求められるが、断熱仕様SSKを用いることによ

り高い保温効果が得られるため、従来の保温養生方法よりも簡便に効率よく品質管理を実施できることがわかった。断熱仕様SSKでは、セメントの水和熱をコンクリートの保温に積極的に活用でき、コンクリートの初期養生の安定化にも役立つ。さらに、断熱効果の評価に搭載した温度センサがそのまま利用できるため、どのくらいの保温養生が施されているかをリアルタイムで監視でき、自動記録されたデータから保温養生の効果を評価することも可能となる。

今後、スマートセンサ型枠(SSK)システムは、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て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ことが期待される。

JICMA

《参考文献》

- 1) 野口貴文ほか：スマートセンサ型枠と総合的なコンクリート工事・品質管理システム、建設の施工企画、2013年2月
- 2) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針、2008年

【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)
見玉㈱
エンジニアリング事業部
事業部長