

## 論文の要旨

### 題目：RC 建築物の施工および維持管理におけるセンサモニタリング要素技術の提案 (Proposal for underlying technology for sensor monitoring in construction and maintenance of RC buildings)

氏名 蘇 振東

本論文では、RC 造建築物において合理的な施工管理と維持管理の実現に向け、容易に設置・計測できる無線技術を活用した濡れセンサシステムおよび振動モニタリングシステムに的を絞って、フレッシュコンクリートの打込み状態、セメント水和熱、「水」の移動による「部材内部の濡れ」を監視する技術、並びに高速道路のトールゲートの屋根スラブの点検・診断技術を基盤とし、RC 造建築物の施工および維持管理におけるセンサモニタリング要素技術の提案を行った。本論文は 6 章で構成され、各章の内容は以下のとおりである。

第 1 章では、センサモニタリング技術の要素技術開発に的を絞った本研究の目的、論文の構成を示した。

第 2 章では、建築・土木の生産および維持管理分野において、活用が検討されてきたセンサ技術を調査した。現地計測の簡便化、特にケーブルの配線作業を容易にできる無線通信方式を採用したセンサモニタリング技術は重要であることを明らかにした。本研究に関連する内容として、下記の 2 点を示した。

1. コンクリートの充填性管理において、複数設置するセンサを on/off で点計測する手法より、可能な限り少数のセンサで広範囲をまとめて監視できる技術はセンサの設置作業の効率化を達成できる。コンクリートの打込み管理では充填高さや密実性の確認が重要であるが、密実性につながる豆板等の空洞の検知に関する検討は少ない現状である。
2. RC 建築物の維持管理における既往の研究では、二次部材や非構造部材の健全性は重要なモニタリング対象であるが、それに関する提案が少なく、さらに交通振動によるトールゲートの屋根スラブの長期振動計測についての実績はほとんどないのが現状である。また、一般のユーザに対して操作が簡単、結果が分かりやすい日常点検手法の提案は維持管理に重要である。

第 3 章では、本研究で用いた 2 つのセンサ計測システムを示した。計測システムは無線通信技術を駆使し、広島大学建築材料学研究室が地域・産学連携センターにおいて民間企業と共同開発を進めているものである。本章では計測原理、構成および機能の概要を説明するとともに、実験室レベルで実施した基礎実験の結果のもとに、モニタリングシステムの計測精度を明らかにした。本章で得られた主要な成果を以下に示す。

#### I. 帯状濡れセンサシステムについて

1. 長い電極線を楕円状に配置した仕様の帯状濡れセンサは、計測対象の比誘電率の変化から水分を検知して濡れの具合を推定できる。一定の長さで区分した 1 基のセンサは 1 つの計測値を出力し、その出力値がセンサの濡れ深さの増加に伴って上昇し、全部が濡れたときに最大値を示す。この仕様は、振動締固め効果の確認とともに、コンクリートの表面に生じる豆板の検知できる見通しを得た。
2.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  水溶液での計測結果から、溶液の濃度、すなわちフレッシュコンクリートの代表的なイオン濃度の変化は濡れセンサの出力値に与える影響が小さいことを明らかにし、フレッシュコンクリートを計測対象として本センサが活用できることを示した。水中での計測結果から、計測対象の温度は濡れの判断に影響しないほど小さく、センサにラップフィルムを覆

うことで、センサを保護しながら濡れの計測できることを明らかにした。

3. センサが空気中におかれた場合、気温、相対湿度による計測値の変動は無視できるほど小さい。また、センサの出力値は電極の長さや幅、間隔に依存するため、コンクリート工学上には意味がなく、計測値と初期値との比較、センサ各基間の比較が濡れ状況の計測に重要であることを指摘した。

## II. 振動モニタリングシステムについて

1. 常時微動から強震まで精度よく計測できる振動モニタリングシステムは、レーザー変位計の計測結果との比較により、計測値の時刻歴波形の基線補正を行い、周波数領域で積分を行う際にハイパスフィルタを適用することで、計測された加速度データから速度および変位を精度良く算出できることを示した。
2. 本研究で対象とする構造物の計測におけるセンサの固定方法を検討した結果、本研究で選定した両面テープ止めはビス等による機械的固定方法と同等の計測結果が得られ、変位の計測精度に影響しないことを明らかにした。

第4章では、コンクリートの施工管理および建築物の維持管理を高度化するために、帯状濡れセンサシステムを用いたモニタリング手法を提案した。コンクリートの打込み実験、模擬の豆板の検知実験、水和熱モニタリング実験および模擬コンクリート壁での結露モニタリング実験を試験室レベルで行い、提案手法は実建築物に適用できる見通しを得た。本章で得られた主要な成果を以下に示す。

1. コンクリートの打込み（充填）管理について：

初期値を基準として、計測結果であるセンサ出力率の上昇により、その位置にコンクリートが達したことが分かる。振動締固めを行ったことによって、複数設置したセンサの出力率間のばらつきが小さくなり、すべての出力率は同じ値に収束していく。この収束は、コンクリートが密実に充填されたことを意味する。また、振動締固めを行った後に、センサ出力率が他の箇所よりも低い部分は、豆板によりコンクリートがポーラスになっている箇所と推定できることを明らかにした。以上の結果は、この濡れ計測システムが、コンクリートの打込み時にリアルタイムで充填性・密実性の判断をできることを示している。

2. セメント水和熱管理について：

簡易断熱温度上昇試験の計測結果により、帯状濡れセンサに付属する温度センサの計測値は熱電対の計測値と一致し、温度センサが熱電対と同程度の精度を有することが分かった。すなわち、本センサはコンクリートの温度履歴を高精度で計測できることを明らかにした。

3. 維持管理（結露検知）について：

硬化後のコンクリート部材の表面に濡れセンサを存置することにより、供用期間、すなわち維持管理において、建築部材間に発生した結露や漏水を検知することが可能なことを、実験室レベルの検証実験によって確認した。

第5章では、高速道路の入口に位置するトールゲートの屋根スラブを対象として、合理的な維持管理の実現を目的としたモニタリング技術確立に向け、モニタリング項目を抽出してその有効性を明らかにした。具体的には、約2年にわたる長期の振動計測の結果から振動モニタリングシステム用いた今後モニタリングの一手法を提案した。本章で得られた主要な成果を以下に示す。

1. 1列の柱が中央を支持する形式の屋根スラブは、交通振動により、常時、大きくかつ複雑な上下振動を繰り返していることを明らかにした。この振動性状は振動（変位）リサージュで

可視的な監視が可能であり、このリサーチは屋根スラブの管理に重要なモニタリング対象であることを示した。

- 2 1次固有振動数の変動から貫通ひび割れに伴うスラブの剛性低下の検知が可能であることをFEM解析から確認した。しかし、交通振動に伴う屋根スラブの繰返し上下振動は複雑であり、計測された加速度のフーリエスペクトルのピーク値のみから機械的に求める1次固有振動数はばらつくことがある。このばらつきによる影響を抑えるためには、1次固有振動数の連続的なモニタリングを行った上での判断が重要である。
- 3 屋根スラブを1質点系モデルとみなし、加速度と変位との関係から直線回帰でスラブの剛性が算出できる。剛性から換算した等価1次固有振動数はばらつきが若干あったが、同定した1次固有振動数と一致し、安定した値を示したため、屋根スラブの剛性をモニタリング対象とすることは重要となることを指摘した。
- 4 3軸の加速度の合成ベクトルを用いてセンサ位置の屋根スラブの角度は求められる。この角度により屋根のたわみ角の変化を感知できるため、屋根スラブの劣化検知に角度のモニタリングは極めて重要と考えられる。また、地震前に計測された角度と地震後に計測された角度と比較することは、屋根スラブの地震時の安全性評価指標となりうる。
- 5 長期振動計測で観測された気温の年変動は固有振動数、スラブ剛性、角度のモニタリング結果に与える影響を明らかにし、今後のモニタリングシステムの構築において、季節を考慮してモニタリング項目の閾値の設定を変更する必要があることを指摘した。

第6章では本論文の各章で得られた結果と結論を総括として示した。