

委員会報告 実構造物への適用性を重視した各種センサ技術の調査と 体系化研究委員会

大久保孝昭*1・渡辺博志*2・杉山央*3・江里口玲*4・内田慎哉*5・大野健太郎*6・谷口円*7・玉置一清*8

要旨: 本研究委員会は、飛躍的に進歩しつつあるセンサ技術・ネットワーク技術を建設分野において活用し、鉄筋コンクリート構造物の生産や維持管理を高度化するための調査を行った。数十年後の土木構造物・建築物には多くの種類のセンサが設置され、構造物の利用者や管理者は、計測データを有効活用しながら構造物の供用を行っていることを想定し、その基盤を構築するための調査研究成果を導くことを目的とした。調査研究は3つのWGにより、(1) 建設生産や維持管理におけるセンサ技術に対するニーズ整理、(2) センサ・計測に関するシーズ技術の動向および(3) モニタリングの事例とデータの活用方法の調査を実施した。

キーワード: センサ、センサネットワーク、電子データ、モニタリング、品質管理、維持管理

1. 調査研究の目的と調査の方法

1.1 委員会設置の目的

近年、建設分野においては、社会インフラの維持管理におけるセンサ技術の実用化を促されており、センサモニタリング技術を活用した建設生産システムや維持管理システムの構築が盛んに取り組まれている。特に土木構造物では国土交通省が合理的な予防保全の仕組みを達成するために「SIP 戦略的イノベーション創造プログラム」を実施し¹⁾、国を挙げた技術開発に取り組んでいる。

本研究委員会は、構造物や部材の施工品質や健全度(劣化度)を判断するために、実構造物において、計測の制約にとらわれず何をどの部位で計測し、どのような物性値で評価するかを明確にし、合理的な評価を実現するために必要な各種センサ計測技術を纏めることを目的として設置した。

1.2 調査研究の方法

本研究は飛躍的に進歩しつつあるセンサネットワーク技術を建設分野において活用し、建設生産や維持管理を高度化するための調査を行った。数十年後の土木構造物・建築物には多くの種類のセンサが設置され、構造物の利用者や管理者は、計測データを有効活用しながら構造物の供用を行っていることを想定し、その基盤を構築するための調査を実施することとした。

委員会では、下記の3つのWGを組織し、調査研究を実施した。

- ・WG1： 建設生産や維持管理におけるセンサ技術に対するニーズ整理と技術体系化
- ・WG2： センサ・計測・ネットワークに関するシーズ

技術の動向調査

- ・WG3： 点検・モニタリングの事例調査とデータの活用方法

WG1では、センサ技術を駆使した建設生産・維持管理の現状と将来分析について検討を行った。具体的には、構造物や部材の施工品質の確保および構造物の長寿命化(健全性の維持)のために、検査技術や診断技術などに対するセンサニーズを抽出した。分析結果の表示方法は、対象物(建築物、土木構造物、橋梁など)、活用時期(製造、施工、維持管理など)、用途(強度推定、劣化予測、状態監視など)、計測値(変位、温度、加速度など)によるカテゴリーにおいて検索したい項目を指定すれば、それに対応したセンサの情報を閲覧できるデータベースとして纏めた。

WG2では現状のセンサ技術のシーズ整理を実施した。シーズ調査では、産業分野をはじめ多くの分野で利用されている各種センサについて体系的に分類したうえで、その原理や特徴について整理した。調査、センサメーカーおよびセンサ技術利用企業にヒアリングとアンケートを実施し、実構造物への適用性も含め、体系的に整理を行った。

WG3では、点検・モニタリングデータの保管技術とその活用方法について検討を行った。具体的には、これまでに行われたモニタリングの事例を調査し、データの収録方法や活用方法について検討を行った。手間を掛けてセンサで計測を行っても、活用できないデータが収録されるのであれば全く意味がない。また、データの収録や共有方法、収録頻度なども、計測目的に応じて選定することの重要性を指摘している。

*1 広島大学学術院 工博 (正会員)

*2 国立研究開発法人土木研究所 博士(工学)(正会員)

*3 宇都宮大学大学院 博士(工学)(正会員)

*4 太平洋セメント株式会社 (正会員)

*5 立命館大学 博士(工学)(正会員)

*6 首都大学東京大学院 博士(工学)(正会員)

*7 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 博士(工学)(正会員)

*8 三井住友建設株式会社 (正会員)

1.3 研究体制

本委員会は表-1に示す委員で活動を行った。

表-1 委員会構成

| | | | |
|-----------|--|-----------|--|
| 委員長 | 大久保孝昭 (広島大学) | 副委員長 | 渡辺博志 (土木研究所) |
| WG1 主査 | 杉山央 (宇都宮大学) | WG2 主査 | 江里口玲 (太平洋セメント) |
| 幹事 | 内田慎哉 (立命館大学) 玉置一清 (三井住友建設) 長谷川拓哉 (北海道大学) | 幹事 | 大野健太郎 (首都大学東京) 谷口 円 (北海道立総合研究機構) |
| 委員 | 稲田 裕 (清水建設) 小川亜希子 (竹中工務店) 川瀬みなみ (コンステック) 中村聡宏 (建築研究所) 南 正樹 (忠南大学校) 宮内博之 (建築研究所) | 委員 | 上田 洋 (鉄道総合技術研究所) 大塚裕太 (太平洋コンサルタント) 高谷 哲 (京都大学) 中村秀明 (山口大学) 細野恭成 (アイベック) 渡邊悟士 (大成建設) |

なお、本委員会の成果は、委員会に所属する委員が調査した範囲に留まっており、すべての技術を網羅しているとは考えてはいない。ここで纏められた技術以外にもRC 構造物の品質管理や維持管理に有益なセンサ技術があることをご理解いただきたい。

2. 建設分野におけるセンサ技術のニーズ

2.1 建設分野におけるセンサ技術利用事例に関する調査

建設分野では、センサ技術を利用して計測値を入手し、それらを実際の工事や維持管理に役立てている事例が数多くある。また、今後センサ技術を役立てようとするアイデアも種々提案されている。ここでは、建設分野のどのような場面でセンサ技術が利用されているのか、またどのような場面でセンサ技術の利用が期待されているのか、現状と将来の両面から建設分野におけるセンサ技術に対するニーズを調査した。

まず、本委員会の委員全員から、すでにセンサ技術が利用されている事例および将来センサ技術の利用が期待される事案（以降、これらをまとめて利用事例と表記する。）を抽出した。本委員会には、建設分野（建築および土木分野）において材料、構造、維持管理等を専門とする研究者・実務者が委員として参画している。この建設分野の多方面の委員による様々な視点から抽出作業を行った。

続いて、抽出した利用事例を、表形式の「利用事例リスト」とカード形式の「利用事例シート」の2つの形に整理した。

利用事例リストには、次の9項目を示すことにした。

- (1) タイトル
- (2) 目的（センサを利用する目的）
- (3) 現状と今後の課題（センサ利用の現状と今後の課題）

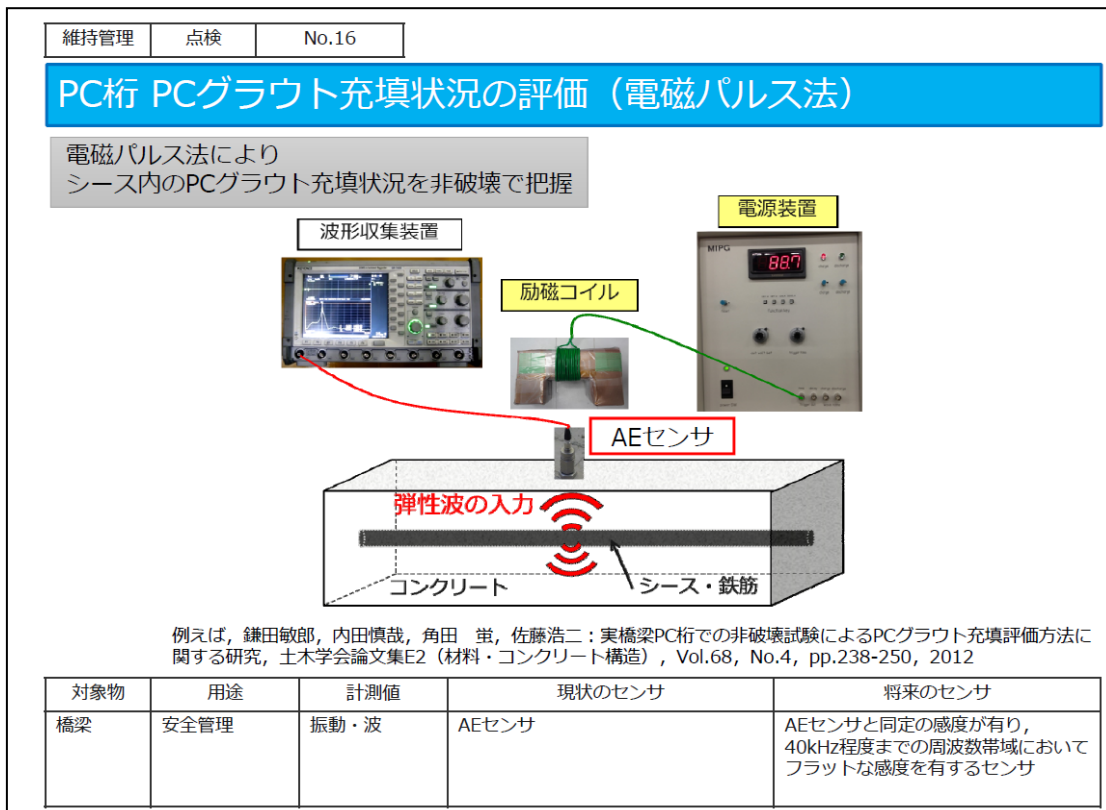


図-1 利用事例シートの例

表-2 各カテゴリーにおいて設定したキーワードと事例数

| 【対象物】 | | 【活用時期】 | | 【用途】 | | 【計測値】 | |
|---------|----|----------|-----|--------|----|--------|----|
| 建築・土木全般 | 88 | 製造・運搬 | 1 | 品質管理 | 16 | 温度 | 9 |
| 建築物 | 16 | 施工（打込み） | 2 | 安全管理 | 12 | 水分 | 16 |
| 土木構造物 | 7 | 施工（養生） | 8 | 環境管理 | 1 | 力 | 12 |
| 橋梁 | 34 | 施工（脱型） | 5 | 荷重履歴 | 5 | 形状・寸法 | 15 |
| 道路 | 3 | 施工（全般） | 11 | 状態監視 | 37 | 位置・変位 | 14 |
| 港湾施設 | 1 | 施工（安全管理） | 4 | 異常検知 | 24 | 加速度 | 10 |
| | | 維持管理（点検） | 103 | 劣化予測 | 13 | 振動・波 | 33 |
| | | 維持管理（補修） | 9 | 強度推定 | 9 | 化学的計測値 | 10 |
| | | 災害時 | 6 | 構造性能評価 | 16 | 画像 | 10 |
| | | | | 変形把握 | 2 | その他 | 20 |
| | | | | ひび割れ計測 | 2 | | |
| | | | | その他 | 12 | | |

- (4)対象物（センサを設置する対象物）
- (5)活用時期（センサの活用時期）
- (6)用途（センサの用途）
- (7)計測値（センサによる計測値）
- (8)現状のセンサ（現状で使われているセンサ）
- (9)将来のセンサ（将来、開発または改良が期待されるセンサ）

利用事例シートには、次の9項目を示すことにした。

- (1)タイトル
- (2)概要文（利用事例の概要を説明した短い文章）
- (3)概要図（利用事例の状況を説明した図や写真）
- (4)対象物（センサを設置する対象物）
- (5)活用時期（センサの活用時期）
- (6)用途（センサの用途）
- (7)計測値（センサによる計測値）
- (8)現状のセンサ（現状で使われているセンサ）
- (9)将来のセンサ（将来、開発または改良が期待されるセンサ）

利用事例シートの一例を図-1に示す。シートは、利用事例を「概要図」で説明している点に特徴がある。これは、図や写真を活用することにより、センサの利用状況をより具体的に表現しようと意図したものである。

利用事例リストにおける「現状と今後の課題」については、委員の私見も含まれるが、これは当該分野の専門家からの意見として尊重することにした。同様に、利用事例リストおよび利用事例シートにおける「将来のセンサ」も委員の考えに基づいたものである。

利用事例リストおよび利用事例シートに共通した項目である「対象物」、「活用時期」、「用途」、「計測値」は、利用事例を類型化するためのカテゴリーとして用いることにした。委員から事例を集めた後、全情報を概観し、

設定した。後にデータベースとして活用するため、各カテゴリーに10種類前後となるキーワードを設定した。カテゴリー、キーワードは表-2に示すとおりである。また、各キーワードの横の数字は、事例数を表す。各カテゴリーにおける分類は、厳密な基準を設定して区分・分類したものではなく、あくまでも傾向を分析する際の参考として位置付けたものである。また、これらのキーワードにより、利用事例シートを分類し、データベースとして提供した。

2.2 建設分野におけるセンサ技術の利用の現状と将来像

建設分野におけるセンサ技術のニーズを、表-2に示すセンサ技術の利用事例数から概観する。

対象物に関しては、建築・土木全般に対応した利用事例が多く、センサ技術が建築・土木全般の広い範囲で利用されている状況が明らかとなった。次いで、橋梁に対応した利用事例が多く、橋梁分野でセンサ技術に対する高いニーズがあることがわかる。

活用時期に関しては、維持管理段階における点検に対応した利用事例が多かった。コンクリートの製造・運搬や施工は比較的短い期間で完了するため、人間が施工現場で品質管理や検査を直接行うことが可能である。これに対して、維持管理は数十年もの長い期間に及び、さらに人間がその場で継続的に点検等を行うことは困難であるため、センサを利用して無人で長期間の管理・監視を実現させるとのことへのニーズの現われと推測される。

用途に関しては、状態監視および異常検知に対応した利用事例が多かった。これは、活用時期と関連があり、維持管理（点検）の期間において、センサが状態監視や異常検知の用途で利用されるという筋道と理解できる。

計測値に関しては、各キーワードに分散しているが、振動・波に対応した利用事例が多かった。これは、振動・

波を計測するためのセンサが数多く開発され、その種類も多く、広く普及していることと関連があるものと推測される。

将来のセンサに関しては、無線化へのニーズが最も高く、次いで計測精度の向上、小型化、低価格化への期待が高かった。

3. センサ技術のシーズ調査

3.1 シーズ調査の概説

コンクリート構造物の製造から維持管理に至るまで、躯体コンクリートの状態把握を目的として様々なセンサが使用されている。本章では、これらの各種センサの体系的整理とヒアリング・アンケートから得られた内容について整理を行い、将来的なシーズを明らかにし、センサ技術とコンクリート構造物の融合する未来を出来る限り具現化することとした。

3.2 コンクリート構造物に適用される一般的な各種センサとその種類

本項では、コンクリート構造物の施工品質および健全度の判断材料となる代表的な計測項目に対し、一般的に利用されているセンサについて整理した。なお、対象となるセンサは、土木・建築分野に限らず、他分野で使用されているセンサも調査範囲とした。

計測項目は、温度、湿度、水分、変位・ひずみ、振動、圧力および濃度（pH、酸素・二酸化炭素、硫化水素および塩化物）の7項目とし、各計測項目について利用されているセンサの種類、計測原理および特長をまとめた。

表-3 に温度におけるセンサ種類、計測原理および特徴の一例を示す。また、各種センサがコンクリート構造物で利用されているシーン、もしくは利用可能なシーンを

表中に併記した。

本項で挙げたセンサについては、すでにコンクリート構造物に適用されているセンサもあれば、未だ適用されていないセンサもある。また、コンクリート構造物に適用されているセンサにおいても、(1)電源の確保、(2)ケーブルの取り回し、(3)センサの耐久性・耐候性、(4)計測精度および(5)コストなどの課題があることから、使用頻度が低いセンサも少なくはない。

3.3 各種センサ技術およびセンサ適用技術に関する調査と調査結果の分析

実際に各種のセンサや計測技術を提供している方々や、それらの各種技術を活用している方々のご協力のもと、本委員会では各種センサ技術およびセンサ適用技術に関するアンケート調査およびヒアリング調査を実施した。なお、各調査表の取りまとめは項目を「物理的情報」、「センサ種類」、「技術種別」、「用途」、「回答者立場」とし、それぞれについて分類を行った。

ヒアリングおよびアンケートでは、18社（アンケート協力8社、ヒアリング協力10社）全57件の回答を得た。この各技術を回答者の立場で分類すると、使用者が4社9件、製作者が7社20件、使用者と製作者双方が11社28件であった。なお、複数の技術をご紹介いただいた企業のなかには、技術ごとに立場が異なる場合があった。ここで、技術種別において、複数の要素が体系的に構成され、何らかの機能を発揮するまとまり（一式）を「システム」と称し、個別要素として機能を発揮するものを「個別要素」と称し、分類した。その結果、システムが17件、個別技術が40件であり、個別要素として機能を発揮する機器および技術（個別技術）が7割を占めている。そこで技術種別ごとに分類した結果に基づき、それ

表-3 温度のセンサ種類、計測原理、特徴^{1)~3)}

| 計測項目 | センサ種類 | | 計測原理 | 特徴 | コンクリート構造物での利用シーン |
|------|----------|-------|-------------------------|---|------------------|
| 温度 | 熱電対 | | 温度に対応した熱起電力 | <ul style="list-style-type: none"> ・測定領域が広い ・応答速度が速い ・低コスト ・加工しやすい | コンクリート内部の温度測定 |
| | 抵抗体温度センサ | サーミスタ | 温度による電気抵抗の変化 | <ul style="list-style-type: none"> ・高感度、高精度 ・省電力な計測が可能 ・形状が小さい | |
| | | 白金抵抗 | 温度による電気抵抗の変化 | <ul style="list-style-type: none"> ・安定性が高い ・高精度 ・耐久性に優れている | |
| | IC温度センサ | | 温度による電気抵抗の変化 | <ul style="list-style-type: none"> ・高精度 ・経時変化が少ない ・形状が小さい ・低コスト | |
| | 放射温度センサ | | 測定対象物の表面から放射される赤外線エネルギー | <ul style="list-style-type: none"> ・遠距離からの測定が可能 ・応答速度が速い ・非接触で測定が可能 ・速い温度変化の測定が可能 ・移動物体および微小物体の測定が可能 | コンクリート表面の温度測定 |

ぞれの傾向を分析した。なお、以降に示す傾向分析は一つの技術に対して複数の計測項目や用途が含まれる場合、重複して件数をカウントしている。また、この傾向分析はあくまでも本委員会では情報収集することができた技術を対象としたものであることに留意いただきたい。

システムに分類された 17 件のうち、計測項目と用途の関係に着目すると図-2 に示すとおり、計測項目として最も多い変位・ひずみを含む大半の技術は、モニタリングと製造に概ね二分され、施工時の品質管理や常時計測することで維持管理に活用される技術が多くシステム開発に取り組みられているといえる。また、一般的に利用されるセンサの計測項目に該当せず、その他に分類された技術のなかには、点検（定期的）を用途とした画像センサや IC センサによる点検補助もしくは自動検出システム、施工管理上の安全を用途とした位置センサによる監視、警報システムなどが見られた。

一方、個別技術に分類された 40 件では（図-3）、計測項目として最も多い変位・ひずみや振動ではモニタリングに偏りがあるものの、他の計測項目は詳細調査と製造が大きな割合を占めている。また、その他に分類された技術には、コンクリート強度の推定や内部欠陥の検出などの同じ計測項目を対象にした複数の技術や、画像センサを用いた技術が多く見られた。

3.4 センサおよびモニタリング技術に関する課題

本調査結果の多くは、すでに「製品化」や「事業化」されているものも多く、直接的なシーズといえる製品は多くなかった。一方、各技術においては現状の課題や将

来的な発展性が具体化されており、それらの分析結果から課題抽出を行い将来に向けた期待を含め技術シーズについて明らかにすることを試みた。ヒアリングおよびアンケート結果の分析から得られた技術課題には、(1)センサ計測値の信頼性確保、(2)センサ取付方法の確立、(3)センサデータ形式の標準化、(4)長期モニタリングでの課題、(5)海外製品計測機器の発展に関する背景と課題、(6)技術力に関する課題、(7)構造物全体系としての判断、(8)建設現場の安全性におけるモニタリングの課題などが挙げられた。

3.5 実構造物への適用範囲の拡大が期待できるシーズ技術

実験的な検討も含め、過去、多くのセンサおよび関連技術の適用事例が見られるものの、未だ実構造物への適用範囲は限定的な技術も多く、センサ技術が普及しているとは言い難い。一方で昨今の半導体技術や ICT 技術の進歩、センサのコストダウンにより、一般社会では、益々多くのセンサ技術が活用されている。各種センサ技術の適用可能性が向上している状況を鑑み、本節では調査したセンサ技術の中から、現段階ではコンクリート分野や構造物には適用されていないセンサ技術を対象として、コンクリート構造物への適用可能性について概説する。

本稿では、一例としてコンクリート中の pH 測定に適用可能と考えられるセンサを紹介する。一般的な pH を計測するセンサは、ガラス電極により計測する方式であり、測定対象は溶液状態であることから硬化コンクリートである実構造物への適用は困難である。図-4 に示すセンサは Ion Sensitive Field Effect Transistor（イオン感応性電界効果トランジスタ）を採用した固体素子型の pH センサであり、イオン活量によって発生する、測定サンプルとイオン感応膜の表面電位を検出する方式で、水分量、温度の各センサを半導体基板上に 1 チップに混載している⁵⁾。すでに、今まで困難であった土壌環境を対象に pH 測定を実現しており、コンクリートへの適用についても期待される。

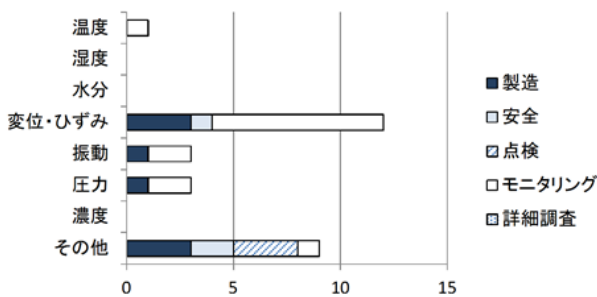


図-2 計測システムにおける計測項目ごとの用途分布

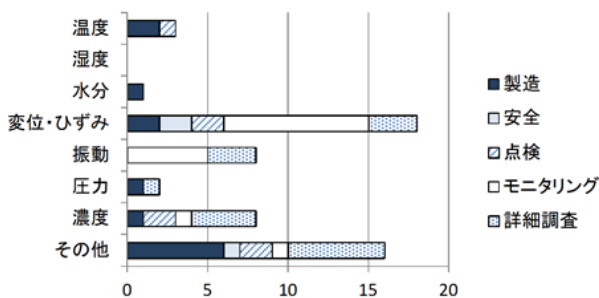


図-3 個別技術における計測項目ごとの用途の分布

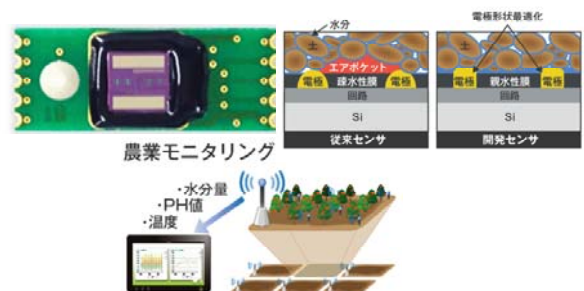


図-4 新しい pH センサと適用事例

4. 実構造物でセンサを活用した事例調査

4.1 調査概要

ここでは、点検・モニタリングデータの保管技術とその活用方法について検討を行った。手間を掛けてセンサで計測を行っても、活用できないデータの山が築かれるのであれば、全く意味がない。また、データの収録や共有方法、収録頻度なども、計測目的に応じて異なるはずである。そこで本 WG では、これまでに行われてきたモニタリングの事例を集め、データの収録方法や活用方法の現状を把握し、今後の課題を探ることとした。

事例調査は下記の 6 項目に纏め、それぞれの事例で、センサ技術が活用できた点、逆にうまく機能しなかった点を整理し、それぞれの事例で今後の課題を整理した。

- (1)目的・・・なぜセンサ計測を行うのか
- (2)計測・・・目的を達成するためにどのような計測を行っ

表-4 データ活用のために検討すべき事項

| 項目 | データの種類 | 利点、特徴 | 課題、要望等 |
|------------------|------------------------|---|--|
| データの種類 (デジタル) | ビッグデータ | 従来では把握できなかった新しい分析の可能性 (データの連続性、事実のみに基づき既成概念の排除など) | 保存容量が膨大に必要 取扱いが重く、専門知識が必要 |
| | デジタル画像データ | 標点を同時撮影することで、高精度の変形分析が可能 →カメラ解像度の向上で、精度は年々向上 非接触であり、遠隔からのデータ採取が容易(ドローン搭載など) ○近い将来、接触型のセンサーにとって代わる可能性あり | 標点等の指標がない一般的な画像からは、精度よい分析は困難 |
| | 点群データ | 3D座標、色データを有し、広範囲のデータを短時間で取得可能 ○移動しながらの測定など、用途は拡大 | データ取得条件によって精度のばらつきが大きい →広範囲のデータでは精度の悪いデータも混在する。 |
| データの種類 (アナログ) | アナログデータ(手書き等) 写真データ | スキャナでデジタル化すれば、画像分析の可能性 (昔の膨大な情報をデータとして有効活用したい) | 誤変換、エラー等の確率が高く、人が選択、判断必要 |
| データの一時保存 | パソコン+HDD等の電子媒体 | デジタルデータを保存するには一般的 | フィールドでは電源の確保が大きな課題 →通常、インバータ発電機(6~8時間程度) →長期計測(モニタリング)では商用電源確保が必須 |
| | 電池内蔵、記録媒体付センサー | 運用が容易であり、精度等を満足すれば、モニタリングの活用率は、飛躍的に伸びる可能性あり | 現状は、最大でも1年程度で電池交換の必要があり、多点の測定には不向き |
| データ転送方法 | 無線技術(衛星、LAN、wifi) | 現場配線がなく、設置作業は容易になる | 災害時に弱い(衛星通信は比較的、強い?) 構造物が障害となり、伝達距離は意外に短い 電力消費が大きく、電源の確保が最大の課題 |
| データの補正 | ばらつき、安定性 | センサー固有の問題(分解能が低い等)や、フィールドでは磁場の影響によりデータが安定しないケースが多々ある | ばらつき、安定性を、極力、事前に把握し、用途に応じたセンサーの選定が必要 |
| | 温度・湿度等、環境の影響 | ほぼ、すべてのセンサーには温度依存があり、別途温度測定を行い、補正が必要(センサーには補正係数があり) | センサー位置と温度測定位置が異なる場合もある (温度補償内蔵型センサー等の開発が望まれる) |
| | 絶対精度(長期測定の場合) | センサー自体や配線部の劣化により、データのシフトが生じる場合がある(センサー機能は喪失していると言える) | 左記を判断することは一般的に困難 →絶対に不動なものを同時測定して、引き算補正等の対策 (絶対校正機能を有する測定器等の開発が望まれる) |
| データ分析・活用 | データベース | デジタルデータの場合、作成だけは比較的容易 | しかし、活用には高度な知識が必要 |
| | 見える化(グラフ化) | 変化点、特異点などの把握が容易に(見える化しにくい、データ活用は困難) | どのデータ同士を比較するか等、利用者が用途に応じて、個別に判断が必要 →ソフトの汎用化は困難で、実務的には一品製作になる |
| 将来予測(マルコフ分析等) | データを蓄積する大きな目的の一つ | | 予測精度を上げるには、差測値のフィールドバックシステムが必要 |
| データの保管場所 | クラウド | 情報の共有化手段として有効 (管理者どうし、現場で過去データ参照等) | アクセス権限、セキュリティなどが必要 |
| | BIM、CIM(3次元モデル) | 設計、施工時のデータとあわせて、データ保管プラットフォームとして、多重分析に期待 | 作業量が膨大で、コストが大きくなるため、一般化はまだ難しい (重要構造物等から運用) |

たのか

(3)データ管理・・・計測時のデータ管理の方法はどのようにしたか

(4)データの処理・・・計測結果はどのように処理したか

(5)活用・・・処理したデータはどのように活用できたか

(6)課題・・・今後の課題として何が挙げられるか

また、計測データの保管方法や管理方法以外に、建設分野でセンサ技術を活用する際に最初に検討すべき項目を表-4に整理した。

4.2 事例調査の対象

事例調査は下記の 8 項目について整理した。

(a)アーチ橋における情報化施工

(b)FBG 光ファイバーを用いた橋梁モニタリング

(c)成田空港誘導路橋梁モニタリング

(d)路線バスによる橋梁モニタリングシステム

(e)ユビキタスネットワークによる土砂災害監視システム

(f)住宅における濡れセンサシステムの活用に関する実証実験

(g)超高層ビルのモニタリング(韓国ロッテタワー)

(h)深層学習による画像処理を用いたコンクリート変状抽出

(i)ラマン分光分析を用いたコンクリート構造物の劣化評価

5. 総括ーセンサ技術を活用したモニタリングシステムへの期待ー

コンクリート構造物や建築物では、これに作用する各種外力に対して、想定される供用期間内において、求められる性能が満足されるよう設計を行うこととなる。作用する外力としては、地震力を含む各種の荷重や、飛来塩分や凍結融解作用などの環境的な作用も含まれる。構造物および建築物にもたらされるこうした作用は、確定値ではなく確率的に分布するものであり、また構造物を構成するコンクリート物性値、あるいは構造解析に関しても不確実性が存在するため、照査においては部分係数や許容応力度の導入により、一定の信頼性を確保されることとなる。

しかし、構造物のライフサイクルを通した荷重の大きさや作用位置、作用回数、周辺の地盤変位、あるいは環境作用については、設計で想定した範囲を超える確率は存在する。また、コンクリート構造物に進行する複合劣化など、設計時に十分には考慮されていないものもあり、構造物には設計で想定した挙動とは異なる状況になることが否定できない。

このため、維持管理において、日常点検や定期点検の実施を通じて、構造物に異常が発生していないかどうか、

その構造物に求められる性能が確保されているかを確認する。ここで、構造物に異常が認められた場合には、診断を実施し、補修や補強対策を実施する、あるいは経過観察を行うなど等の対応により、構造物の性能について信頼性を確保する。

こうした維持管理を適切に行うことは、構造物の機能に対する信頼性を確保するうえで欠かせないものであるが、構造物の建設時と異なり、これに費やすことができる労力やコストは一般には非常に限られたものとなる。今後、建設産業に従事する技術者の不足が想定される中、構造物の点検の省力化を推進し、人間の目に代わる新たな点検データの取得ならびに取得データの保存管理を効率的に行えるシステムの普及が望まれるところである。

一方で、コンクリート構造物・建築物の健全度や供用性の判断を行ううえで、外観目視点検結果は重要な根拠資料となるのは当然であるが、これのみでは、必ずしも診断の質を確保できないことがある。例えば、コンクリート中に存在する鉄筋や PC 鋼材等の補強鋼材の腐食、中性化の進行などは、構造物の健全度評価や将来予測に非常に重要な根拠資料となるが、そうしたデータを外観目視の調査結果のみから取得することは難しい。すなわち、健全度診断の質を向上するためには、工学的に適切な診断を下すうえで必要となる客観的データの取得が重要となる。こうしたデータには様々なものが想定されるが、定期的あるいは継続的にデータを取得するためには、人力のみでは限界があり、センサ技術を活用したシステムを構築することが必要となる。

このように、センサ技術を活用したモニタリングシステムには、人間が行う目視点検の一部を代替し点検の省力化を図ったり、構造物・建築物の健全度診断の質の向上を図ったりすることが期待される。

ただし、こうした役割を担っていくうえで解決すべき点も多く残されていると考えられる。一つには、モニタリングを計画する段階での、システムの検出すべき事象の範囲の設定が考えられる。例えば、中性化によるコンクリート中の鉄筋腐食に対する健全度を診断するためのシステムを考えると、対象とする事象は非常に限定的であり、モニターすべき指標も比較的明快である。しかし、対象構造物の使用状況や置かれる環境条件からすると必ずしも対象とする事象（ここでは中性化による鉄筋腐食）のみを観測するだけでは目的を達成しえない。逆に、対象構造物や建築物の総合的な健全性評価を目的としたモニタリングシステムとしてしまうと、非常に対象が多岐にわたり、結果的にモニタリングシステムが大規模になりシステムの稼働や維持そのものに要するコストならびに運用上の複雑さなど、困難な状況が生じることが予想される。モニタリングシステムに期待する役割、

モニタリングシステム運用期間や維持管理体制を勘案し、計画段階においてモニタリングシステムが担う役割や適用範囲を適切に設定することが重要になると考えられる。

次に、センサ技術を用いたモニタリングシステムを有効活用するうえで重要となることは、モニタリングの結果何らかのアクションをする際の判断指標の明確化である。例えば、構造物に発生するたわみのモニタリング結果に基づいて、

- ・緊急の補修対策を講じる
- ・構造物の詳細調査をする
- ・特段のアクションを取らない

といった判断をすることになる。こうした判断をする際の閾値の設定の問題である。これには工学的な“割り切り”が必要になるものと考えられるが、対象構造物の要求性能を勘案した適切な値の設定が必要であると考えられる。

このように、センサ技術を活用したモニタリングシステムに対する期待が大きければ大きいほど、システムの役割や具体的な活用イメージを明確化した戦略を立てることが求められよう。

鉄筋コンクリート構造物の生産や維持管理において、センサ計測システムを活用する明確な目的やその活用方法を定めるのは、土木分野そして建築分野の技術者である。これまで我々コンクリート分野の技術者は、実構造物においてこのようなセンサ技術を駆使して生産性や安全性を高めるために他分野の技術者と連携することには消極的であったと勝手ながら判断している。

コンクリート構造物の品質、安全性確保や長寿命化のために、他分野の技術者と連携し、我々の知らない技術を建設分野に取り込むことも必要ではないだろうか。

本委員会の成果が、この分野に取り組む技術者の方の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP (2017年4月1日確認)
<http://www.mlit.go.jp/common/001124111.pdf>
- 2) 大森豊明監修：センサ実用辞典，フジ・テクノシステム，p.1674，1986.
- 3) 柳田博明：最新 検知システム総覧“センサ”その開発と進歩，株式会社技術資料センター，p.840，1982.
- 4) 日本機械学会編：湿度・水分計測と環境のモニタ，技報堂出版，p.471，1992.
- 5) ラピスセミコンダクタ（株）：世界初 土壌環境のリアルタイムモニタリングが可能な土壌センサを開発（プレスリリース），2015.10

