

氏名（本籍）	岩城 英朗	（神奈川県）
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	甲第 210 号	
学位授与の日付	平成 30 年 3 月 22 日	
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当	
学位論文題目	電磁波を用いた空間連続計測に基づく構造物の挙動評価に関する研究	
論文審査委員	（主査） 教授	田村 和夫
	（副査） 教授	山田 丈富
	教授	中野 克彦
	教授	鈴木 誠
	教授	内海 秀幸

学位論文の要旨

電磁波を用いた空間連続計測に基づく構造物の挙動評価に関する研究

建築・土木構造物に対するセンサなどを用いた計測は従来から行われてきたが、近年大型化・複雑化する構造物の挙動評価を行うためには大量のセンサや配線を必要とすることなどが課題となっていた。その一方で、計測や検査手法、さらにセンサ素子に用いる材料などに関する技術開発は日々進んでおり、光ファイバなどの新たな材料をセンサ素子として活用する検討や、構造物の外部から振動や温度変化を捉えることが可能な検査装置が実用になりつつある。

このような状況の中、本研究は、建築・土木構造物の変形挙動評価のために、電磁波を用いた空間連続計測法を提案し、さらに同計測から得られる後方散乱波の位相変化と強度変化の双方を用いた計測データの分析法を示したものである。本論文は全 5 章の論文で構成されており、各章の概要は以下に示す通りである。

第 1 章「序論」では、本研究の背景を述べ、既往の研究を整理して本研究の目的と位置づけを示した。

第 2 章「光波を用いた線的計測」では、構造物の連続的かつ静的なひずみ変化や温度変化を捉えることができる光ファイバ分布計測に着目し、構造物へ光ファイバ分布計測を適用する際の課題を整理した上で、構造物に設置できる光ファイバセンサの開発とその適用に関する研究を行っ

た. さらに, 実際の長大斜張橋への適用を通じた線的計測法および計測データの分析法を述べた.

まず, 通信用に広く適用されている細径石英ガラス製の光ファイバをそのままセンサ素子として活用し構造物に適用する際の破断や劣化などの課題に対し, コンクリートへの埋設あるいは構造物表面への貼付が可能な光ファイバひずみセンサおよび温度センサを製作し, 基本特性試験を通じてその適用性を示した.

さらに, 開発した光ファイバ分布センサを実際のコンクリート斜張橋の施工時から完成後の供用時を通じて適用し, 計測システムの構築法, および光ファイバセンサの設置法を示した.

設置した光ファイバセンサで取得したひずみ分布, あるいは温度分布と従来のセンサの計測値との間の良好な相関を確認した上で, 斜張橋の主桁に設置した光ファイバセンサのひずみ計測値を用いて主桁の線形(たわみ)計測が行えることを示した.

加えて, 後方散乱光の位相(波長)変化からひずみ分布, あるいは温度分布を捉える従来の方法に対して, 後方散乱光の強度変化を併せて捉えることで, ひずみ分布計測値, および温度分布計測値の評価を行うとともに, センサの長期耐久性の担保につながる余寿命推定, さらに計測システム全体の異常検知を行うことができることを示した.

第3章「電波を用いた面的計測」では, 構造物の様々な部位の変形や振動を一括して捉えることが可能なレーダー技術に着目して, 構造物の外部から計測する際の課題を整理した上で, 計測装置の設置法およびレーダーから得られた計測値から構造物の変形および振動分布を取得する一連の処理法について述べた.

まず, 人工衛星搭載型合成開口レーダー(衛星 SAR)で取得した平成28年熊本地震前後の観測データに対して差分干渉解析を行い, 構造物の変状を捉える検討を行った. その結果, 散乱波の強度変化から広範な観測範囲から被災した構造物の抽出が行える可能性があることを示した.

次に, 計測対象の動的な変位あるいは振動を面的に一括して捉えることが可能な高速イメージングレーダーの概要を述べ, 構造物の計測に適用する際に必要なレーダーの観測視野, すなわちレーダーの計測データが示す位置(座標)と, 構造物の規模や位置などを示す三次元直交座標の変換処理法を提示した.

また, レーダーで得た計測データと複数の計測点の座標を統計処理して座標変換を行う方法を示すと共に, 異なる地点に設置した複数の計測装置(レーダー)を同時に用いた計測を行い, 双方の計測データを処理することで構造物の挙動をより精緻に捉える計測法についても述べた.

第4章「高層建物における面的計測の検証」では, 実際に高層建築物に対して建物の外部からレーダーを用いた計測を行ない, 第3章で述べた電波を用いた面的計測法の検証を行った.

計測対象建物の外部にレーダーを設置して建物に対して電波を送信し, その電波に対して建物

の各部から反射・散乱する電波を受信する計測を行った。この計測で得られた受信波（散乱波）から対象建物のほぼ全域で散乱波の位相変化（微小な変位）が生じていることを確認し、これらの値から対象建物の面的な振動分布が得られることを示した。

さらに、計測対象建物の周囲2箇所にレーダーを設置して異なる方向から同時に計測を行った。それぞれのレーダーで得た散乱波の位相変化を合成することで観測対象建物の長辺および短辺方向の振動をそれぞれ抽出できることを示し、さらにこれらに対する周波数解析を行った結果、既往の加速度計などを用いた振動計測と同等の卓越振動特性を得ることができた。

以上の結果より、電波を用いた面的計測法の有効性を示すことができた。

第5章「結論」では、各章で得られた成果を要約し、本研究の結論および今後の本研究の展開について述べた。

審査結果の要旨

建築・土木構造物に対し、センサなどを用いた計測により挙動評価を行うことは従来から行われてきたが、近年大型化・複雑化する構造物の挙動評価を行うためには大量のセンサや配線を必要とすることなどが課題となっていた。その一方で、計測や検査手法、さらにセンサ素子に用いる材料などに関する技術開発は日々進んでおり、光ファイバなどの新たな材料をセンサ素子として活用する検討や、構造物の外部から振動や温度変化を捉えることが可能な検査装置が実用になりつつある。

本研究は、建築・土木構造物の変形挙動評価のために、電磁波を用いた空間連続計測法を提案し、さらに同計測から得られる後方散乱波の位相変化と強度変化の双方を用いた計測データの分析法を提示したものである。従来の構造物のモニタリング技術では不可能であった、大型構造物の変形や振動などの空間・時間的に連続した挙動を、電磁波を用いることで簡易的に評価可能とする、一連の手法を提案している。従来の構造モニタリング技術では、震災時に被害を受けて内部に立ち入れない建物や、大規模で複雑な構造物などの空間・時間連続的な振動評価は困難であったが、本手法によればこれらの評価が可能となる画期的な手法である。

本論文は全5章で構成されており、各章の概要は以下に示す通りである。

第1章「序論」では、本研究の背景を述べ、既往の研究を整理して本研究の目的と位置づけを示している。

第2章「光波を用いた線的計測」では、構造物の連続的かつ静的なひずみ変化や温度変化を捉えることができる光ファイバ分布計測に着目し、構造物に光ファイバ分布計測を適用する際に課題となる、破断や劣化などの問題を解決する、コンクリートへの埋設あるいは構造物表面への貼付が可能な光ファイバひずみセンサおよび温度センサを製作し、基本特性試験を行い性能を評価した。さらに、開発した光ファイバ分布センサを実際のコンクリート斜張橋の施工時から完成後

の供用時を通じて適用し、計測システムの構築法、および光ファイバセンサの設置法の有効性を確認している。すなわち、設置した光ファイバセンサで取得したひずみ分布、あるいは温度分布と従来のセンサの計測値との間の良好な相関を確認した上で、斜張橋の主桁に設置した光ファイバセンサのひずみ計測値を用いて主桁の線形（たわみ）計測が行えることを示している。さらに、後方散乱光の位相（波長）変化からひずみ分布、あるいは温度分布を捉える従来の方法に対して、後方散乱光の強度変化を併せて捉えることで、ひずみ分布計測値、および温度分布計測値の評価を行うとともに、センサの長期耐久性の担保につながる余寿命推定、さらに計測システム全体の異常検知を行うことができることを示している。

第3章「電波を用いた面的計測」では、構造物の様々な部位の変形や振動を構造物外部から一括して捉えることが可能なレーダー技術に着目して、計測装置の設置法およびレーダーから得られた計測値から構造物の変形および振動分布を取得する一連のデータ処理手法を示している。本章ではまず、人工衛星搭載型合成開口レーダー（衛星SAR）で取得した平成28年熊本地震前後の観測データに対して差分干渉解析を行い、広範な観測範囲から散乱波の強度変化を基に、被災した構造物の抽出が行える可能性を指摘した。次に、計測対象の動的な変位あるいは振動を面的に一括して捉えることが可能な高速イメージングレーダーを用いて、構造物の計測に適用する際に必要なレーダーの計測データの位置（座標）と、構造物の規模や位置などを示す三次元直交座標の変換処理法を提示している。さらに、異なる地点に設置した複数のレーダー計測装置を同時に用いた計測により、構造物の挙動をより精緻に捉える方法についても記述している。

第4章「高層建物における面的計測の検証」では、実際に高層建築物に対して建物の外部からレーダーを用いた計測を行ない、第3章で述べた電波を用いた面的計測法の検証を行っている。すなわち、計測対象建物の外部にレーダー装置を設置して建物に対して電波を送信し、建物の各部から反射・散乱する電波を受信する計測を行った。この受信波（散乱波）から対象建物のほぼ全域で散乱波の位相変化（微小な変位）が生じていることを確認し、これらの値から対象建物の面的な振動分布が得られることを示した。さらに、計測対象建物の周囲2箇所にレーダーを設置して異なる方向から同時に計測を行い、それぞれのレーダーで得た散乱波の位相変化を合成することで観測対象建物の長辺および短辺方向の振動を抽出できることを示した。これらに対する周波数解析結果は、既往の加速度計などを用いた振動計測結果と同様の卓越振動モード特性を有していた。以上の結果より、電波を用いた面的計測法の有効性を確認した。

第5章「結論」では、各章で得られた成果を要約し、本研究の結論および今後の本研究の展開について述べている。

本論文は上述のように、簡便かつ効率的に建築・土木構造物の変形や振動などの挙動評価を行う手法として、光波を用いた光ファイバによる線の連続計測法、および電波を用いたレーダー技術による面的連続計測法、すなわち電磁波を用いた一連の空間連続計測法を提案し、その有効性を実証したものである。ここで提案された計測手法は、空間的な広がりを持つ構造物の多量の情報を一括取得ができる優れた先駆的手法であり、本研究の工学的価値は高い。

以上より、学位申請者である岩城英朗は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。