

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	電氣的インピーダンスと位相角に基づく CFRP シートで被覆したコンクリートの損傷検出に関する基礎研究 (Fundamental study on the damage-detection method using electrical-impedance variations and phase-transition for deteriorated concrete covered with fiber reinforced polymer sheets)
氏 名 (Name)	冨田 健次

近年, 高度成長期に大量に建設された住宅・社会インフラの老朽化が顕在化してきている。一方, 人口減少に起因する厳しい人的資源問題に対応して建設財政悪化の状況になってきている。さらに, 近年では住宅や社会インフラに大きな影響を与えることとなる巨大地震の発生も予想されている。こうした中, 構造物のリダンダンシー確保, 耐震性確保および向上のため, 繊維強化ポリマー (FRP) シートの表面被覆工法に代表される補強がしばしば行われている。

コンクリート構造物の内部劣化事象の検出には, 電磁波や超音波, 衝撃弾性波といった物理的な刺激を構造物内部に印加した時の内部からの反応を診る非破壊試験法が用いられているが, 表面を FRP シートで覆われたコンクリート構造物では, 有効に物理的刺激を内部に伝達させることも, 内部からの刺激に対する反応情報も得ることができず, 内部の劣化度を評価することが困難となっていた。

FRP シート接着工法における FRP シートの浮きや剥離, 未接着, 表面ひび割れ等を検出する技術に関する研究は数多く行われているが, FRP シートで覆われたコンクリート構造物内部の劣化事象の検出技術に関する研究はほとんどされていない。

本研究では, 表面を炭素繊維強化ポリマー (CFRP) やアラミド繊維強化ポリマー (AFRP) シートで被覆されたコンクリート内部の劣化を検出するため, 表面を覆っている CFRP や AFRP を含めたコンクリート構造をひとつの誘電体と考え, その電氣的インピーダンスの周波数特性を調べた。そして, この特性を用いてコンクリートの内部劣化を検出する非破壊試験法を提案する。本論文は, この非破壊試験法を開発する過程における基礎的実験についてまとめたものであり, 全 7 章から構成されている。各章の要旨と結論について以下に示す。

「第 1 章 序論」では, 本研究の背景として, 日本の社会インフラのおかれた現状について述べた。本研究の対象となる繊維シートについてその変遷や種類を示しながら, 繊維シート補強の必要性について述べた。あわせて表面を FRP シートで覆われたコンクリート構造物内部の状態について, これまでの非破壊試験で調査することの困難さを述べながら, 本研究で提案する非破壊検査法の有効性について概説した。

「第 2 章 既往の研究」では, FRP シート接着工法によって補強された構造物の変状調査に関する研究や, FRP シート施工時に生じる欠陥検出に関する研究についてレビューした。

「第 3 章 検出原理と適用条件の設定」は, 本研究で提案する電氣的インピーダンスおよび位相角の周波数を用いた非破壊試験による損傷部の検出原理と, これを適用できる条件についてまとめた。

「第4章 表面ひび割れの検出」では、電氣的インピーダンスおよび位相角の変化を基に、繊維強化ポリマー (FRP) シートで覆われたコンクリート表面近傍にあるひび割れを検出する技術開発を目的とした。表面直下に人工ひび割れを設けた、一辺 200mm の立方体のコンクリート表面を FRP シートで被覆した試験体を作製し、その試験体に 1MHz から 8MHz までの交流電圧を負荷させた状態における、インピーダンスおよび位相角の周波数特性を調べた。インピーダンスおよび位相角の測定には、人工ひび割れの真上位置、左位置と右位置で 2 電極端子を有するプローブを用いた。この基礎実験から、印加する交流電圧の周波数が 3MHz~4MHz 付近でインピーダンスが極大値をとり、位相角が負から正に変化することがわかった。このことから、ひび割れを跨ぐように電極端子を配置した場合のインピーダンス極大値は、これを跨がないように電極端子を配置した際に測定されるインピーダンス極大値よりも高いこと、同時にひび割れを跨ぐように電極端子を配置した際に測定される位相変位周波数は、これを跨がないように電極端子を配置した際に測定される位相変位周波数よりも低いことが明らかになった。

「第5章 内部損傷の検出」では、電氣的インピーダンスおよび位相角の周波数特性の変化を基に、炭素繊維強化ポリマー (CFRP) シートで覆われたコンクリート内部にある劣化損傷を検出する技術開発を目的とした。表面を CFRP シートで被覆し、凍結融解試験により内部を強制的に劣化させた直方体形状の試験体を作製し、1MHz から 8MHz までの交流電圧を印加させた状態におけるインピーダンスおよび位相角の周波数特性を調べた。インピーダンスおよび位相角の測定には、試験体を挟み込むように配置した 2 電極端子を有するプローブを用いた。この基礎実験から、凍結融解作用により、CFRP シートで被覆したコンクリートのインピーダンス極大値は低下することと、位相変位周波数が大きくなることが明らかになった。

「第6章 等価回路モデルによる検証」では、第4章と第5章で得られた結果を基に、本研究における実験系の等価回路モデルを考案し、その数値解析と実験結果を比較検証した。その結果、インピーダンス極大値の傾向は実測値と等価回路モデルから推定される傾向は一致することがわかった。

「第7章 結論」では、本研究で得られた知見と成果を要約するとともに、今後の課題についてとりまとめた。

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	冨田 健次
審 査 委 員	主 査 : 吉武 勇
	副 査 : 麻生 稔彦
	副 査 : 河村 圭
	副 査 : 中島 伸一郎
	副 査 : 渡邊 学歩
論 文 題 目	電氣的インピーダンスと位相角に基づく CFRP シートで被覆したコンクリートの損傷検出に関する基礎研究 (Fundamental study on the damage-detection method using electrical-impedance variations and phase-transition for deteriorated concrete covered with fiber-reinforced polymer sheets)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>コンクリート構造物の内部劣化事象の検出には、電磁波や超音波、衝撃弾性波といった物理的な刺激を構造物内部に印加した時の反応を診る非破壊試験法がしばしば用いられている。表面を FRP シートで覆われたコンクリート構造物では、有効に物理的刺激を内部に伝達させることも、内部からの刺激に対する反応情報も得ることができず、内部の劣化度を評価することが困難であった。FRP シート接着工法における FRP シートの浮きや剥離、未接着、表面ひび割れ等を検出する技術に関する研究は数多く行われているが、FRP シートで覆われたコンクリート構造物内部の劣化事象の検出技術に関する研究はほとんどなされていない。</p> <p>本研究では、表面を CFRP や AFRP シートで被覆されたコンクリート内部の劣化を検出するため、表面を覆っている CFRP や AFRP を含めたコンクリート構造をひとつの誘電体と考え、その電氣的インピーダンスの周波数特性を調べている。そして、この特性を用いてコンクリートの内部劣化を検出する非破壊試験法を提案している。本論文は、この非破壊試験法の開発過程における基礎的実験についてまとめたものであり、全 7 章から構成されている。</p> <p>「第 1 章 序論」では、本研究の背景として、日本の社会インフラのおかれた現状について概説し、本研究の対象となる FRP シートについてその変遷や種類を示しながら、その補強法の必要性について述べている。さらに表面を FRP シートで覆われたコンクリート構造物において、これまでの非破壊検査技術では内部の劣化進行を調査することの困難さを示しながら、本研究で提案する非破壊検査法の必要性を述べている。</p> <p>「第 2 章 既往の研究」では、FRP シート接着補強された構造物の変状調査に関する研究や、FRP シート施工時に生じる欠陥検出に関する研究についてレビューしている。</p> <p>「第 3 章 検出原理と適用条件の設定」は、本研究で提案する電氣的インピーダンスおよび位相角の周波数を用いた非破壊試験による損傷部の検出原理と、これを適用できる条件に</p>	

(様式 9 号)

ついてまとめている。

「第 4 章 表面ひび割れの検出」では、表面直下に人工ひび割れを設けた、一辺 200mm の立方体のコンクリート表面を FRP シートで被覆した試験体を作製し、その試験体に 1MHz から 8MHz までの交流電圧を負荷させた状態における、インピーダンスおよび位相角の周波数特性を調べている。この基礎実験から、印加する交流電圧の周波数が 3MHz~4MHz 付近でインピーダンスが極大値をとり、位相角が負から正に変化することを報告している。この特性を基に FRP シート下でもコンクリートのひび割れを検出できる技術を提案している。

「第 5 章 内部損傷の検出」では、CFRP シートで覆われたコンクリート内部にある劣化損傷を検出する技術開発を目的に、凍結融解試験により内部を強制的に劣化させた試験体について、1MHz から 8MHz までの交流電圧を印加させた状態におけるインピーダンスおよび位相角の周波数特性を調べている。この基礎実験から、インピーダンス極大値の低下と、位相変位周波数の変化を基に、内部損傷を検出できる可能性があることを報告している。

「第 6 章 等価回路モデルによる検証」では、等価回路モデルを考案し、その数値解析と実験結果を比較検証している。その結果、インピーダンス極大値の傾向は実測値と等価回路モデルから推定される傾向は一致することを報告している。

「第 7 章 結論」では、本研究で得られた知見と成果を要約するとともに、今後の課題についてとりまとめている。

公聴会はオンラインのみで実施し、学内外から 29 名の聴講者があった。公聴会における主な質問内容は、従来の非破壊試験法との相違・優位性について、負荷する電場の影響範囲について、ひび割れ等の損傷部に水やエフロレッセンスが介在する場合の影響について、コンクリート中に配置する補強筋（鉄筋）が検出結果に及ぼす影響について、実用化に向けた研究開発の展望について、などであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 3 編、参考論文 0 編）

- 1) 冨田健次, 武田悠治, 長谷川泰聰, 吉武 勇: 電氣的インピーダンスと位相角に基づく FRP で被覆したコンクリートのひび割れ検出技術に関する基礎実験, コンクリート工学論文集, Vol.32, pp.49-57, 2021.
- 2) 冨田健次, 武田悠治, 長谷川泰聰, 吉武 勇: CFRP シートで被覆したコンクリートの劣化損傷の検出に関する一考察, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.21, pp.361-366, 2021.

ほか 1 編