

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

2022 年 3 月

多田 健次

Kenji TADA

山口大学大学院 創成科学研究科

目 次

目次

| | | |
|--------------------------------------|---------|----|
| 学位論文要旨 | ・ ・ ・ ・ | i |
| Summary of the Doctoral Dissertation | ・ ・ ・ ・ | iv |
| 第1章 序論 | | |
| 1.1 研究背景 | ・ ・ ・ ・ | 1 |
| 1.2 繊維シート補強 | ・ ・ ・ ・ | 3 |
| 1.3 本研究の目的 | ・ ・ ・ ・ | 4 |
| 1.4 本論文の構成 | ・ ・ ・ ・ | 5 |
| 第2章 既往の研究 | | |
| 2.1 繊維シート接着工法の変状調査 | ・ ・ ・ ・ | 8 |
| 2.2 FRP シートの剥離検出に関する研究 | ・ ・ ・ ・ | 9 |
| 2.3 FRP シート施工時の欠陥が耐久性に及ぼす研究 | ・ ・ ・ ・ | 10 |
| 2.4 コンクリートの非破壊検査技術 | ・ ・ ・ ・ | 11 |
| 第3章 検出原理と適用条件の設定 | | |
| 3.1 ひび割れ検出の原理 | ・ ・ ・ ・ | 16 |
| 3.2 プロブの製作 | ・ ・ ・ ・ | 18 |
| 3.3 印加する交流周波数の設定 | ・ ・ ・ ・ | 20 |
| 3.4 位相角およびその測定について | ・ ・ ・ ・ | 22 |
| 3.5 位相角の連続性について | ・ ・ ・ ・ | 23 |
| 3.6 第3章のまとめ | ・ ・ ・ ・ | 24 |
| 第4章 表面ひび割れの検出 | | |
| 4.1 実験目的 | ・ ・ ・ ・ | 26 |
| 4.2 使用材料と試験体作成 | ・ ・ ・ ・ | 27 |
| 4.3 実験方法 | ・ ・ ・ ・ | 30 |
| 4.4 ひび割れ深さと周波数特性の変化 | ・ ・ ・ ・ | 32 |
| 4.5 FRP 被覆コンクリートのインピーダンス変化 | ・ ・ ・ ・ | 38 |
| 4.6 FRP 被覆コンクリートの位相角変化 | ・ ・ ・ ・ | 41 |
| 4.7 実験結果に対する考察 | ・ ・ ・ ・ | 44 |
| 4.8 第4章のまとめ | ・ ・ ・ ・ | 48 |
| 第5章 内部損傷の検出 | | |
| 5.1 実験目的 | ・ ・ ・ ・ | 50 |
| 5.2 使用材料と試験体作成 | ・ ・ ・ ・ | 51 |
| 5.3 実験方法 | ・ ・ ・ ・ | 56 |
| 5.4 凍結融解サイクル数とインピーダンス極大値の変化 | ・ ・ ・ ・ | 58 |

| | | |
|----------------|-----------------------|-------------|
| 5.5 | 凍結融解サイクル数と位相変位周波数の変化 | ・ ・ ・ ・ 65 |
| 5.6 | 実験結果に対する考察 | ・ ・ ・ ・ 71 |
| 5.7 | 第 5 章のまとめ | ・ ・ ・ ・ 74 |
| | | |
| 第 6 章 | 等価回路モデルによる検証 | |
| 6.1 | 目的 | ・ ・ ・ ・ 75 |
| 6.2 | 表面ひび割れおよび内部損傷測定系の等価回路 | ・ ・ ・ ・ 76 |
| 6.3 | 等価回路のインピーダンス | ・ ・ ・ ・ 78 |
| 6.4 | 等価回路と実測値の比較 | ・ ・ ・ ・ 79 |
| 6.5 | 第 6 章のまとめ | ・ ・ ・ ・ 81 |
| | | |
| 第 7 章 | 結論 | |
| 7.1 | 本研究のまとめ | ・ ・ ・ ・ 83 |
| 7.2 | 今後の課題と研究展望 | ・ ・ ・ ・ 85 |
| | | |
| 本論文に関する著者の発表論文 | | ・ ・ ・ ・ 86 |
| | | |
| 付録 | | |
| 本研究で測定されたデータ | | ・ ・ ・ ・ 87 |
| | | |
| 謝 辞 | | ・ ・ ・ ・ 119 |

学位論文要旨

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

寿田 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。

Summary of the Doctoral Dissertation

Fundamental study on damage-detection method using electrical-impedance variations and phase-transition for deteriorated concrete covered with fiber-reinforced polymer sheets

Kenji TADA

In recent years, the aging of housing and civil infrastructures, which were constructed in large numbers during the period of rapid economic growth, has become more noticeable. On the other hand, human resource problems are becoming more severe due to the declining population and the deterioration of construction finances. In addition, the occurrence of huge earthquakes is expected to have a significant impact on structures. Various strengthening methods such as covering the surface with fiber-reinforced polymer sheets have been employed to ensure the redundancy and earthquake resistance of structures.

To detect the internal deterioration of concrete structures, non-destructive testing methods that examine the internal response to physical stimuli such as electromagnetic waves, ultrasonic waves, and impact elastic waves are used. However, it is hard to examine the degree of internal deterioration of concrete structures covered with FRP sheets because it is impossible to effectively transmit physical stimuli to the interior and to obtain information on the response to internal stimuli.

Previous researches on the detection for debonding of FRP sheets were conducted, however, researches on the detection of internal deterioration of concrete structures covered with FRP sheets are very few.

The purpose of this study was to develop a suitable method to detect internal degradation of concrete covered with carbon or aramid FRP (CFRP / AFRP). The study assumed the concrete structure including CFRP and AFRP covering the surface as a single dielectric. The study examined the electrical impedance frequency of the FRP-covered concrete to clarify the internal damages. This paper consists of seven chapters. Contents of each chapter are shown below:

Chapter 1,” Introduction”: The current situation of civil infrastructures in Japan is described described to emphasize the research significance of this study. This chapter explained the strengthening method using various the fiber-sheet materials, and addressed the necessity of the non-destructive testing (NDT) for the strengthened concrete. In addition, the chapter showed the difficulty in previous NDT technique for the internal damages of concrete covered with FRP sheets. Based on the research background, the purpose of this study was clarified, and the outline of the thesis was explained.

Chapter 2,” Previous studies”: describes reviewed the investigations conducted on the deformation of structures reinforced by the fiber sheet bonding method and reviewed the studies on the detection of defects in the FRP sheet construction as well.

Chapter 3,” Principle of Detection and Setting of Application Conditions”: A cubic concrete specimen with artificial cracks on the surface was prepared, and the specimen was subjected to AC voltage ranging from 1 kHz to 8 MHz. The impedance and phase angle were measured at the positions just above, left and right of the artificial crack, respectively. The fundamental experiment showed that the impedance decreased uniformly with increasing frequency of the applied voltage and reached the maximum value around 3MHz to 4MHz. In addition, it was observed that the phase angle also changed from negative to positive, regardless of the presence of cracks.

Chapter 4,” Detection of Surface Cracks”: The chapter aimed at developing a non-destructive test for the detection of invisible cracks in the concrete covered with fiber reinforcement polymer (FRP) sheets using electrical impedance variation and phase transition. The study prepared some FRP-covered concrete specimens with an artificial crack. Based on the observations in the former chapter, the study examined the frequency characteristics of impedance and phase under AC voltage with frequency ranging from 1 kHz to 8 MHz. These frequency characteristics were examined using an impedance analyzer, which was controlled by a computer. The impedance and phase were measured using a probe with two electrode terminals. The test results confirmed that the capacitive phase property of cracked concrete altered to exhibit inductive characteristics at approximately 3 to 4 MHz. It was revealed that invisible cracks of the FRP covered concrete are detected by measuring a frequency at the impedance local maximum value and the phase transition property.

Chapter 5,” Detection of Internal Damage”: The chapter reported a fundamental experiment for detecting internal damages of concrete covered with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets. The changes in the frequency characteristics of electrical impedance and phase angle were examined. To simulate the internal damages to concrete, a freeze-thaw test was conducted using CFRP covered concretes. The impedance and phase angle were measured by applying AC voltage ranging from 1 MHz to 8 MHz. The impedance and phase angle were measured using a probe with two electrode terminals placed between the specimens. The experimental result revealed that the impedance maxima of the concrete covered with CFRP sheets decreased and the phase displacement frequency increased due to the freezing and thawing action.

Chapter 6, ” Verification using the equivalent circuit model”: The chapter described an equivalent circuit model for the experimental system based on the results obtained in Chapters 4 and 5. To confirm the validity of the model, the study compared the numerical analysis and experimental results. The comparative result showed that the tendency of the impedance maxima in the calculation was almost equivalent to the measured values.

Chapter 7, ” Conclusions”: The chapter summarized the findings and knowledge obtained from the

fundamental study. In addition, the chapter addressed further researches for practical use of the nondestructive test.

第 1 章

序 論

1.1 研究背景

近年、高度成長期に大量に建設された住宅・社会インフラが、建設後30年から50年を経過するようになり老朽化が目立つようになってきている（表1-1）。図1-1に示すように既にストックが約900兆円にまで膨れ上がってきていることに加えて、超少子高齢化にともなう人口減少によって財政収支の悪化で社会資本整備・維持管理に充てられる予算減少や人的資源不足といった厳しい状況になってきているという問題がある。

表1-1 建設後50年以上経過する社会資本の割合¹⁾

| | 2018年3月 | 2023年3月 | 2033年3月 |
|------------------------------|---------|---------|---------|
| 道路橋 〔約7.3万橋注1〕（橋長2m以上の橋） | 約2.5% | 約3.9% | 約6.3% |
| トンネル 〔約1万1千本注2〕 | 約2.0% | 約2.7% | 約4.2% |
| 河川管理施設（水門等） 〔約1万施設注3〕 | 約3.2% | 約4.2% | 約6.2% |
| 下水道管きよ 〔総延長：約4.7万km注4〕 | 約4% | 約8% | 約2.1% |
| 港湾岸壁 〔約5千施設注5〕（水深-4.5m以深） | 約1.7% | 約3.2% | 約5.8% |

注1)建設年度不明橋梁の約23万橋については、割合の算出にあたり除いている。

注2)建設年度不明トンネルの約400本については、割合の算出にあたり除いている。

注3)国管理の施設のみ、建設年度が不明な約1,00施設を含む。（50年以内に整備された施設については概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約50年以上経過した施設として整理している。）

注4)建設年度が不明な約2万kmを含む。（30年以内に布設された管きよについては概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約30年以上経過した施設として整理し、記録が確認できる経過年数毎の整備延長割合により不明な施設の整備延長を按分し、計上している。）

注5)建設年度不明岸壁の約100施設については、割合の算出にあたり除いている。

さらに、図1-2に示すように首都直下地震や南海トラフ地震の30年以内の発生確率が70%以上と予想されていること、近年激化している気象災害といった強大な自然災害発生の懸念もあいまってきている。

こういった社会的な背景の下で、これまでストックしてきた社会インフラを有効に活用するために長寿命化が施されるようになってきている。スクラップアンドビルドからストック有効活用時代へのシフトが求められるようになってきている。

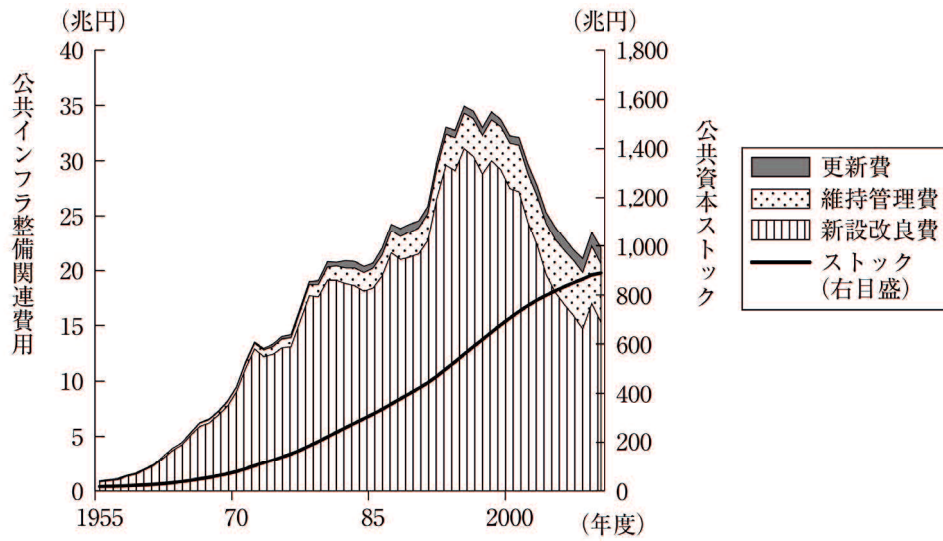


図 1-1 公共インフラ整備関連費用とストックの推移²⁾



図 1-2 主な海溝型地震の評価結果³⁾

1.2 繊維シート補強

近年激甚化している気象災害のような強大な自然災害発生の懸念もあり、スクラップアンドビルドからストック有効活用時代へのシフト、構造物のリダンダンシー確保、耐震性確保および向上が求められてきており、コンクリート構造物に様々な補強対策がなされてきた。これらの補強の中には、繊維強化ポリマー（Fiber Reinforced Polymer: FRP）シートで表面被覆する工法⁴⁾⁷⁾で補強されたコンクリート構造物も多数みられる。建築分野では、2001年国土交通省告示第1024号の一部改正により、FRPシートが建築材料として許容応力度の指定を受け、建築基準法に規定する指定建築材料となったことにより、既存コンクリート建築物の耐震補強にも多く使用されるようになってきている。

1.3 本研究の目的

コンクリート構造物の点検維持管理は一般的に、一次調査と詳細調査と段階を踏んで進められることが多い。一次調査は主として目視で確認できる変状や異常の検出を目的とし、詳細調査は内部の状態を確認することを目的に実施される。内部劣化事象の検出には、電磁波（赤外線やレントゲン含む）や超音波、衝撃弾性波、放射線といった物理的な信号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⁸⁾が用いられている。表面を FRP シートで覆われたコンクリート構造物では、コンクリート表面が目視で確認できないことに加えて、有効に物理的信号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、内部劣化の度合い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なされているが、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みられないことから、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非破壊試験技術の開発を目的とした。

1.4 本論文の構成

本研究では、FRP シートで覆われたコンクリート構造物内部の劣化損傷の検出技術に関してその検出原理を明示し、適用条件を基礎実験から設定し、検出対象損傷を表面ひび割れおよび内部損傷に分けて、それぞれにおいて変化するパラメータを見出した。その上で、損傷部の検出の可能性について実験的に調べたものである。本論文は、全 7 章の構成となっている。

「第 1 章 序論」では、本研究の背景について示し、FRP シートで覆われたコンクリート構造物内部の劣化損傷を検出する手法の必要性を論じた。その上で、本研究の目的と本論文の構成について記述している。

「第 2 章 既往の研究」では、繊維シート接着工法に変状調査や FRP シートの剥離検出技術に関して既往の研究結果を明らかにし、FRP シートで覆われたコンクリート構造物内部の劣化損傷の検出技術に関する課題の抽出を行った。

「第 3 章 検出原理と適用条件の設定」では、本研究にて提案する検出技術の原理について述べた。この章では印加する交流周波数範囲について実験を通じて設定した。

「第 4 章 表面ひび割れの検出」では、深さの異なる人工ひび割れを設けた試験体を用いて、ひび割れ深さと測定されるインピーダンス周波数特性と位相角周波数特性を論じている。また、FRP の種類（炭素繊維、アラミド繊維）やその厚さが異なるシートで覆った試験体を用い、それぞれにおけるインピーダンスの周波数特性、位相角の周波数特性について実験した結果と考察を報告した。

「第 5 章 内部損傷の検出」では、表面を CFRP シートで覆ったコンクリート試験体を準備し、凍結融解試験により内部損傷させた。この試験体に対して交流電圧を印加した時のインピーダンスと位相角の周波数特性を調べた結果と考察を行った。

「第 6 章 等価回路モデルによる検証」では、ひび割れ等の損傷箇所を推定するため、コンクリート表面が CFRP シートで覆われた試験体の等価回路を考案し、インピーダンスおよび位相角の周波数特性を調べた。

「第 7 章 結論」では、第 3 章から第 6 章で得られた研究成果を総括し、本研究の結論を示した。さらに、研究から得られた結果をもとに今後の研究課題と展望について述べた。

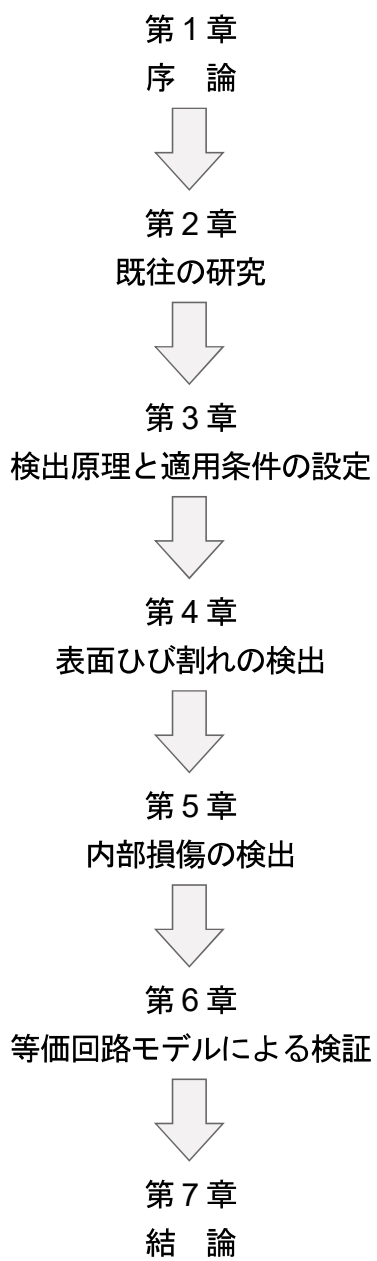


図 1-4 本論文の構成フロー

【参考文献】

- 1) 国土交通省ホームページ：インフラメンテナンス情報,
URL : https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/02_01.html
- 2) 株式会社日本総合研究所：今後のインフラ投資の在り方を考える JRI レビュー, Vol.5,
No.6, pp.84-100, 2013.
- 3) 政府 地震調査研究推進本部：長期評価の広報資料の改善について, 政策委員会総合部会,
2018.7.23
- 4) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライ
ブラリー101号, 2000.
- 5) 日本道路公団試験研究所 橋梁研究室：炭素繊維による鉄筋コンクリート橋脚の補強工法
設計・施工要領（案）, 1995.
- 6) 鉄道総合技術研究所：アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強設計・施工指針,
1996.
- 7) SR-CF 工法研究会：SR-CF 工法による鉄筋コンクリート柱の設計施工指針, 1997.
- 8) 魚本健人, 加藤佳孝：コンクリート構造診断工学, オーム社, pp.66-77, 2008.

第2章

既往の研究

本研究は連続繊維（FRP）シートを接着したコンクリートの非破壊試験を対象とするものである。本研究の位置づけを明らかにするため、本研究に関連する既往の研究を以下にレビューする。

2.1 繊維シート接着工法の変状調査

内藤ら¹⁾は、耐震補強や剥落防止に適用されている繊維シート接着工法のコンクリート構造物を目視、打診、サーモグラフィ調査をした。調査した構造物のうち約2割の繊維シートやシート保護材に何らかの変状があることを示した。また、シートの浮き等の変状はシートの継ぎ手部に多く、接着剤の含浸不足による接着不良、もしくは空気溜まりの除去不足に原因があることを示した。

2.2 FRP シートの剥離検出に関する研究

Ribolla ら²⁾は、FRP とコンクリートの界面に沿って伝播する超音波信号エネルギーを定量化する ETL パラメータと、超音波信号の発信を自動的に検出するために赤池情報量規定を用いた、FRP と基材コンクリートの接合界面の欠陥を検出する手法を提案している。また、2次元 FEM 解析を行い、簡単でコスト効率の高い手法であることを検証した。

金光ら³⁾は、炭素繊維シートで被覆されたコンクリートの剥離は、サーモグラフィ法を用いることで効率化が図れることを示した。また、打撃法を適用することで剥離範囲を精度よく評価できることを示した。

Kharkovsky ら⁴⁾は、二重偏光近距離マイクロ波反射計を、表面を CFRP で覆ったモルタル試験片に適用し、モルタル基材と CFRP との界面に存在する未接着部などの欠陥を画像情報として検出できることを示した。

Taillade ら⁵⁾は、スペックル干渉計技術を基本原理とした表面変位リアルタイム定量的撮像装置であるシアログラフィを、表面を FRP で覆ったコンクリート試験体に適用し、基材コンクリートと FRP との界面に存在する部分的な剥離や損傷などの欠陥を画像情報として検出できることを示した。また、ポリマー接着剤の品質も評価できることを示した。

相良ら⁶⁾は、赤外線カメラを、表面を炭素繊維シートで覆ったコンクリート試験体に適用し、炭素繊維シート直下のコンクリート表面くぼみを熱赤外線画像として検出できることを示した。

2.3 FRP シート施工時の欠陥が耐久性に及ぼす研究

宇佐美ら⁷⁾は、直径 60・40・30・10・5・2mm、厚さ 1mm の浮き欠陥を設けた表面を炭素繊維シートで覆った試験体を用いて凍結融解試験による耐久性試験を実施し、浮きの拡大や水の侵入の有無、炭素線シートの変状の有無について評価した。その結果、直径が 60mm 以下の浮きに関しては、凍結融解試験後にも拡大せず、炭素繊維シートのはがれ等の新たな欠陥も発生しないことを示した。

2.4 コンクリートの非破壊検査技術

村瀬ら⁸⁾は、コンクリート内部欠陥形状の再現を目的として、内部空洞を模擬した無筋コンクリート試験体に対して、直径40mmで共振周波数100kHzの探触子から発振される超音波を用いて、2探触子反射法超音波伝播解析を行った。そして、模擬欠陥までの深さを測定し、その精度の検証を行った。その結果、探触子間距離が小さいほど超音波伝播速度が速くなるが、探触子間距離が大きくなると超音波伝播速度は一定値に収束する傾向があることを示した。また、探触子間距離を変化させ、超音波伝播時間を測定し最小二乗近似法を用いて探触子間距離の補正を行った。その結果、探触子間距離が変化してもほぼ一定の超音波伝播速度に補正することが可能であることを示した。さらに、最大振幅値の時間を補正することでコンクリート厚さや内部欠陥までの深さを±2mm以内の測定精度が得られることを明らかにした。

平田ら⁹⁾は、コンクリートの変状の一つであるひび割れについて、その形状を測定する目的で、幅1mmの斜めスリットを設けた試験体を作製した。その上で、超音波法により詳細に測定しひび割れの形状を図化することを試み、その形状の測定精度について検討した。その結果、乾燥などの影響によりコンクリート内部に超音波伝播速度分布が生じている場合の速度差は、測定方法が異なっても最大で10%程度であることを示した。また、ひび割れが曲面となっている場合には正確な測定ができないまでも、斜めひび割れを立体的に図化することができ、ひび割れの角度により補正が必要であることを示した。

村瀬ら¹⁰⁾は、コンクリートの内部空洞を立体的に可視化することを目的に、平面・斜面・円柱・半円柱の空洞をコンクリート内に設けた試験体を作製した。ひび割れ深さ調査に多用されている超音波法により超音波伝播速度を求めたのち、内部空洞からの反射波とコンクリート底面からの反射波の振幅値をそれぞれ測定・比較した。その結果、第三者でも理解しやすい三次元的にコンクリート内部欠陥を超音波法により可視化することができることを示した。

山下ら¹¹⁾は、測定面から200mmの深さに0~100%まで段階的に充填度を変えたφ93mmのポリエチレンシースを埋め込んだ試験体を作製した。直径30mm重さ100gの鋼球を測定面に打撃することで弾性波を試験体に入力し、高感度加速度センサにより観測される弾性波を、周波数および弾性波速度の変化に着目して測定した。その結果、内部欠陥が存在する場合には、多重反射方向のみかけの弾性波速度が低下することを明らかにした。また、測定波形の周波数分析を周波数応答とする方法では、内部欠陥が相対的に小さい場合、その検出が困難となることと、反射回数が少ない場合には、共振周波数の生成が難しいことを示した。

岩野ら¹²⁾は、コンクリート内部の欠陥探査を目的として、コンクリート供試体側面を健全な段階と欠陥幅12.7mmから124.2mmまで9段階の計10段階に渡り、徐々に寸法を大きくしながら鋼球を打撃することで弾性波を入力し、得られる弾性波振動数を測定した。その結果、幅45.2mm以上の欠陥がコンクリート内部に存在すると、欠陥部と打撃面との間で曲げ振動が発生することを示し、底面で反射する縦弾性波の経路が欠陥を迂回して長くなることを明らかにした。また、欠陥があることでコンクリートの弾性係数が低下し、縦弾性波の速度が低下することを示し、これらの現象によって健全な場合に観測される縦弾性波振動数よりも低い振動数が観測されるこ

とを示した。

岩野ら¹³⁾は、コンクリート内部に生じた豆板を模したポーラスコンクリートを埋め込んだ柱試験体および壁試験体を作製し衝撃弾性波透過法を適用した。弾性波速度を複数経路で測定することで豆板の平面位置、深さ位置を推定した。その結果、豆板が存在すると弾性波速度が低下することを確認した。さらに、その低下は配筋状態や高さ位置により変化することを示した。また、コンクリート内部に測定位置を設定し、その測定位置を伝播経路とする全弾性波の速度を比較して最も早い弾性波速度を評価値とした上で、この評価値を配筋状態や高さ位置を考慮して比較することで、豆板の平面位置および深さ位置を探查できることを示した。

土井ら¹⁴⁾は、コンクリート構造物内部の変状を定量的に把握する目的で、凍結融解作用を想定した劣化層と未劣化層のコンクリート板との積層状供試体を作製し、中心周波数 800MHz の電磁波レーダ機器をその供試体に適用し反射波の計測を試みた。その結果、レーダ受信信号から比誘電率の異なる媒質境界面からの反射波を分離・抽出し、この伝播時間および反射波の極性により、信号伝播モデル法（境界面の位置と深度を見出す方法）を採用することで、内部変状の境界面的に捉えることができ、深さ 12cm 程度までの内部変状境界面を把握することが可能であることを示した。

前田ら¹⁵⁾は、電磁波レーダ法による探查機を用いたコンクリート内部の空洞探查技術の検証を目的に、周波数帯域 500~2300MHz の電磁波レーダをコア孔による模擬空洞を設けたコンクリート試験体に適用した。そして、マイグレーション法による解析をすることで内部の可視化を試みた。その結果、鉄筋間隔が狭い場合には空洞部を探查する精度に大きな影響を与えるものの、鉄筋間隔が 200mm 程度の場合にはコンクリートの充填状態を 1cm ごとの深さで把握できる可能性を示した。

林ら¹⁶⁾は、赤外線サーモグラフィ法によりコンクリートに生じた浮きや剥離といった損傷の検出精度を高める目的に、画像フィルター処理法と、処理画像の特徴量を基に、温度変化部の損傷度の指標としての損傷予測確率を推計する統計解析手法の検討を試みた。その結果、検出精度の向上と客観的な損傷予測指標を得ることが可能であることを示した。

佃ら¹⁷⁾は、橋梁の劣化予測における赤外線調査結果の有用性を確認する目的で、過去の実橋の打音点検で健全と判断されているが、赤外線調査結果では特異な温度差を検出した箇所について実態調査を行った。打音点検では問題と判断できない異常部を模擬した試験体を用いて検証実験をすることで、赤外線調査結果とコンクリートの状態を照合した。また、赤外線調査データによる生存時間解析を行い、予防保全に寄与する維持管理への活用性について検討した。その結果、赤外線調査において特異な温度差を検出した箇所は、外観が健全で打音点検にて濁音がない場合でも、経年劣化が進行している可能性が高いことを明らかにした。また、赤外線調査の熱画像でコンクリート内部の豆板や強度が低下している箇所を検出できることを示した。さらに、赤外線調査の熱画像の特異な温度差が大きい場合、すべての部位で供用 10 年から 15 年で緩やかに進行し、供用 25 年を境に急激に劣化が進行することを示した。

吉田ら¹⁸⁾は、従来からコンクリート構造物の非破壊試験のひとつとして適用されてきた X 線透過法ではなく、後方散乱 X 線を測定する手法により、コンクリート表面からのみの探查の可能

性について研究した。模擬空隙の深さ方向の位置や空隙厚さなどをパラメータとして作成した模擬空隙を有する試験体に適用して、その空隙の検出性能の把握を行った。また、図像処理により内部欠陥の可視化を試みた。その結果、散乱 X 線法によるコンクリートの非破壊検査には、管電圧 200kV 以上の管電圧が必要であることを示し、空隙深さや空隙厚さの探査には探査限界があるものの表面からのみの探査により検出できる可能性を見出した。また、2 次元的に内部欠陥のスキャンを実施し、画像処理することで内部空隙の形状が 3 次元的に把握できることを示した。

大塚ら¹⁹⁾は、コンクリート内部に発生している複雑で微細なひび割れの発生状況を精度よく非破壊検出方法の開発を試みた。透過した X 線透過線量が X 線フィルムに適度な濃度の像を映し出すための撮影条件を求めるための基礎実験を行った。また、フィルムと増感紙との最適な組み合わせ方や、ひび割れ検出条件について検討した。具体には、鉄筋コンクリート試験体に曲げひび割れを発生させ、造影剤を注入することでひび割れの先端位置の検出や、形状を求める実験を行った。その結果、コンクリート内部に生じているひび割れを検出するためには、粒子が比較的小さい #100 フィルムと撮影時間が短くなる HR-16 の組み合わせを用いた方が最適であることを示した。また、造影剤を注入することで、白く明瞭に主ひび割れが確認でき、主ひび割れから枝分かれしたひび割れは灰色に見える領域として確認できることを明らかにした。

【参考文献】

- 1) 内藤 勲, 田口史雄, 野々村佳哲: 連続繊維シート接着による床板補強工の変状調査, 寒地土木研究所月報, No.692, pp.11-19, 2011.
- 2) Ribolla, L.M., Hajidehi, M. R., Rizzo, P., Scimemi, G. F., Spada, A., Giambanco, G.: Ultrasonic inspection for the detection of debonding in CFRP-reinforced concrete, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.14, pp.807-816, 2018.
- 3) 金光寿一, 柳内睦人: 打撃法による炭素繊維シート補強コンクリートの剥離評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.379-384, 2000.
- 4) Kharkovsky, S., Ryley, A. C., Stephen, V., Zoughi, R.: Dual-polarized near-field microwave reflectometer for noninvasive inspection of carbon fiber reinforced polymer-strengthened structures, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.57, No.1, pp.807-816, 2008.
- 5) Taillade, F., Quiertant, M., Benzarti, K., Aubagnac, C., Moser, E.: Shearography applied to the non destructive evaluation of bonded interfaces between concrete and CFRP overlays, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vo.15, pp.545-556, 2011.
- 6) 相良健一, 魚本健人: 炭素繊維シートで補修・補強された RC 構造物の欠陥の検知について, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.1203-1208, 1996.
- 7) 宇佐美 惣, 長田光司, 井ヶ瀬良則, 斉藤 誠: 炭素繊維巻立て工法の施工時の欠陥が耐久性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.1225-1230, 1999.
- 8) 村瀬 豊, 魚本健人: 超音波法によるコンクリート構造物の内部欠陥調査方法に関する研究 (その1), 生産研究, 56 巻, 2 号, pp.172-175, 2004.
- 9) 平田隆祥, 魚本健人: 超音波法によるコンクリート内部ひび割れの形状測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.565-570, 2001.
- 10) 村瀬 豊, 勝木 太, 魚本健人: 超音波法によるコンクリート内部空洞の可視化法, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1923-1928, 2004.
- 11) 山下健太郎, 境 友昭, 極檀邦夫: 弾性波法を用いたコンクリート構造物の内部欠陥探査手法の適用性に関する検討, 第4回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, pp.453-458, 2012.
- 12) 岩野聡史, 極檀邦夫, 境 友昭: 衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1521-1526, 2002.
- 13) 岩野聡史, 實藤大夫, 堀口賢一, 梁 俊, 森濱和正: 複数経路での弾性波速度の測定によるコンクリート内部欠陥探査方法の検討, 日本非破壊検査協会シンポジウム コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.447-452, 2012.
- 14) 土井賢彦, 田中正吾, 城本政一: 電磁波レーダによるコンクリート構造物内部劣化の非破壊検査に関する研究, 第4回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, pp.243-252, 2012.
- 15) 前田悠吾, 山田雅裕, 安田正雪, 柳田淳一, 住 学: 電磁波レーダ法によるコンクリートの未充填部の可視化技術の検討, 第5回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, pp.159-

164, 2015.

- 16) 林 詳吾, 橋本和明, 明石行雄: 赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート損傷の検出精度向上, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1813-1818, 2013.
- 17) 佃 太貴, 高畑東志明, 橋本和明, 林 和彦, 石田哲也: 赤外線サーモグラフィ法を用いた損傷抽出箇所におけるコンクリートの品質と劣化進行に関する一考察, 第6回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, pp.269-276, 2018.
- 18) 吉田幸司, 鳥取誠一, 手島和範: 散乱X線法によるコンクリート内部欠陥探査の可能性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1623-1628, 2002.
- 19) 大塚浩司, 武田三弘: X線造影撮影によるコンクリート構造物内部のひび割れ検出技術の開発に関する研究, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.143-156, 2003.

第3章

検出原理と適用条件の設定

3.1 ひび割れ検出の原理

一般的にコンクリートは完全乾燥状態では電気を通さない絶縁物であるが、水分を含む場合は電氣的な抵抗を示す。また、**図 3-1** に示すように、コンクリートは粗骨材、細骨材、セメント水和物、水、空気から構成される複合材料であり、導電性物質の代表で骨材やセメントに由来する塩化物イオンが存在し、電場中で分極する性質を有する水や水酸化カルシウムを内包している。

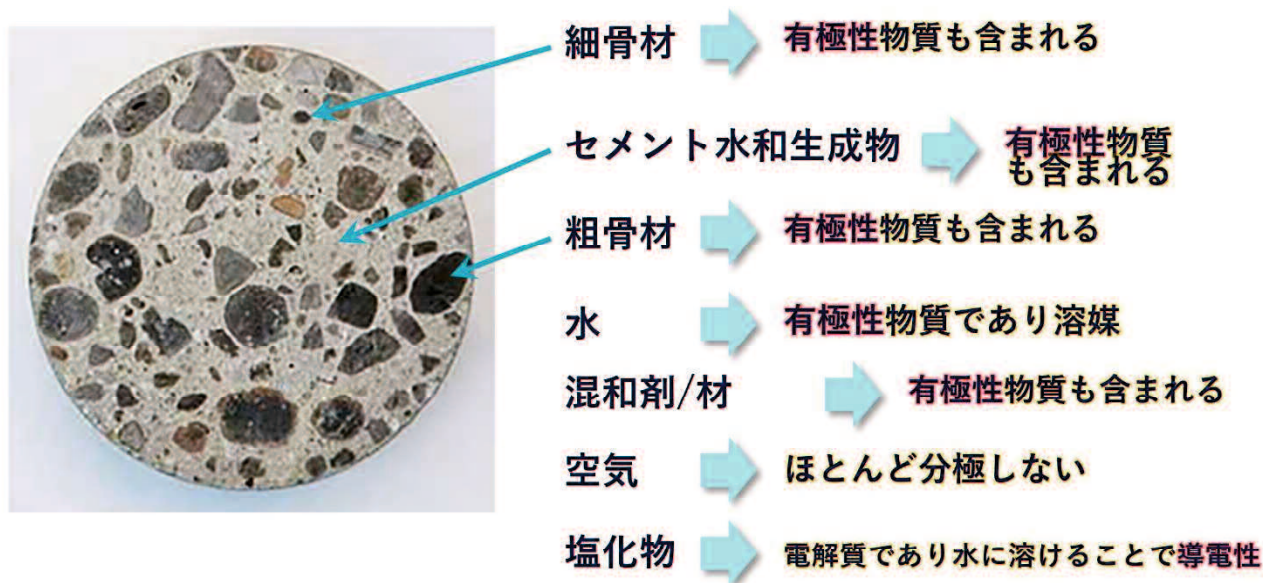


図 3-1 コンクリートの構成成分

これらのことから、電場中に置かれたコンクリートはそれに含まれる有極性物質が分極することにより、電荷を蓄える機能を持った電子デバイスであるコンデンサと等価と考えることができる。このようなコンデンサが蓄えることができる電荷の量は、電場中にある誘電体の分極のしやすさ（誘電率 ϵ [F/m]）に比例する（**図 3-2**）。ここで、誘電率 ϵ は真空の誘電率 ϵ_0 ($\approx 8.85 \times 10^{-12}$ [F/m]) とそれとの比である比誘電率 ϵ_r との積である。比誘電率は物質（誘電体）によって様々な値を示すが、空気の ϵ_r はほぼ 1 であり、コンクリートの ϵ_r は 6~10 程度²⁾ である。

コンクリートは様々な導電性物質や誘電物質を含んだ複合材料であるため、誘電体とみなすことができる。仮にこの誘電体（コンクリート）にひび割れ（空気）が発生したと考えると、元来 6~10 であったコンクリートの比誘電率が、比誘電率が 1 である空気が混ざることによって、みかけの比誘電率が低下すると考えられる（**図 3-3**）。

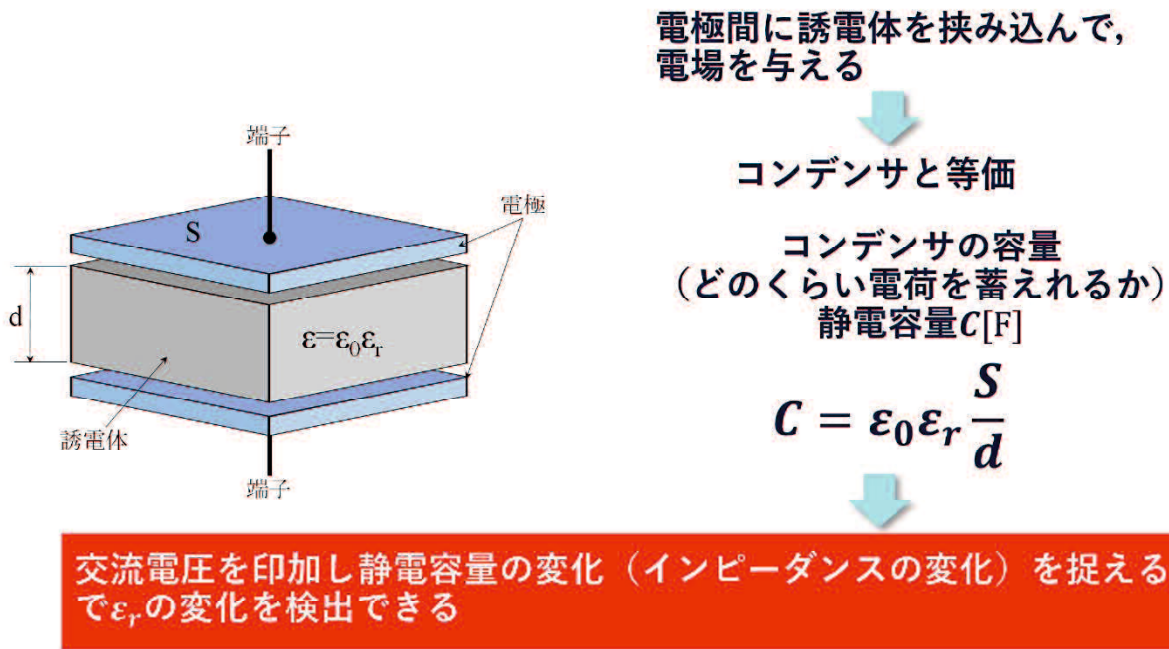


図3-2 コンクリートのみかけの比誘電率の変化の仮説

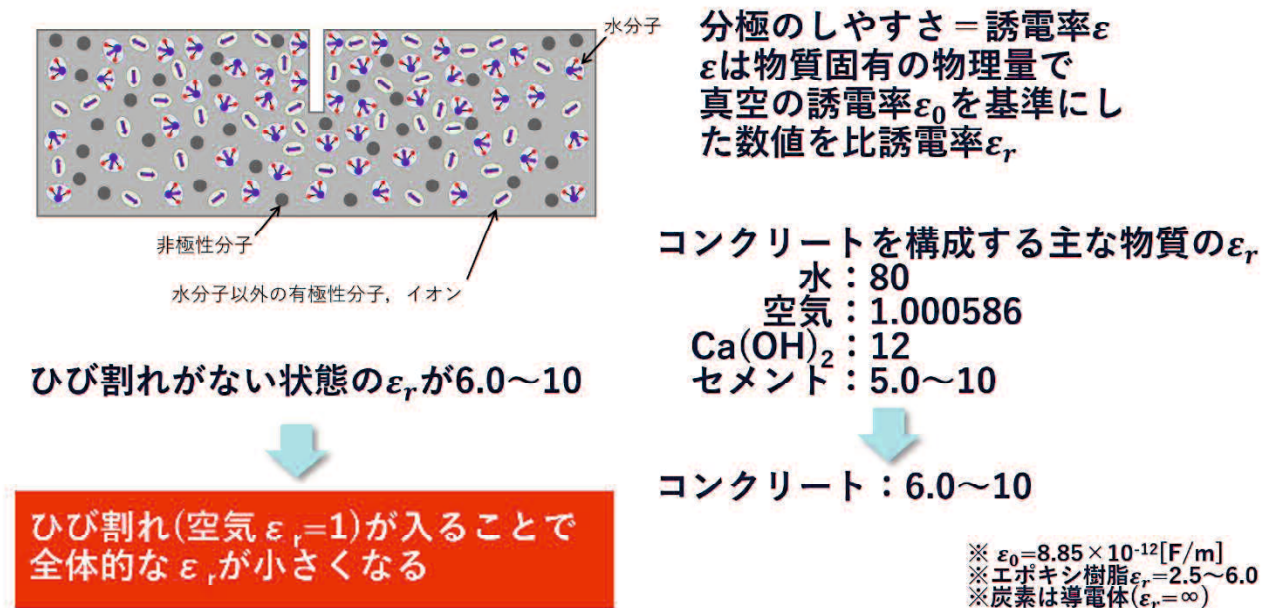


図3-3 コンクリートのみかけの比誘電率

先に述べたように、コンクリートは誘電体であり電場中に置かれると分極し電荷を蓄えるコンデンサと等価とみなすことができる。ひび割れや内部損傷によりみかけの比誘電率が変化するため、電場中のコンクリートの静電容量つまりインピーダンスが変化する。このことから、交流電圧を印加した状態におけるコンクリートのインピーダンス変化を捉えることで、ひび割れや内部損傷を検出する可能性があることに着目した。

3.2 プローブの製作

電場中に置かれたコンクリート中にひび割れが発生すると、ひび割れ発生前に比べて、みかけの比誘電率が変化し、インピーダンスが変化する可能性がある。電場をかけるためには電圧を印加しなければならない。実際のコンクリート構造物は表面がある程度の凹凸があるものであり、表面をFRP被覆しているコンクリート構造物も同様で、その表面には凹凸がある。このことを考慮し、電圧を印加するための電極は平板電極ではなく電極先端が細い端子状のものを採用することにした。また、ある広さがあるコンクリート面に対して、存在するひび割れを検出するためには、作用させる電場内にひび割れが存在していることが必要である。ここで、ひび割れを効率よく検出するために適切な電場について検討した。図3-4に示すように、ひび割れ方向に対してある角度を持った方向に電場を作用させた方が効率よく電場内にひび割れがある状態にできることは明白である。このことから、ある長さを持ったひび割れを効率よく検出するためには、ひび割れ長手方向に対して角度を付けた向きに電場を与える必要があると考え、電極間隔を50mmとしたプローブを製作した(図3-5)。本研究において、電場の作用させる方向は、ひび割れ方向に対して直角となるようにプローブを配置し実験することにした。

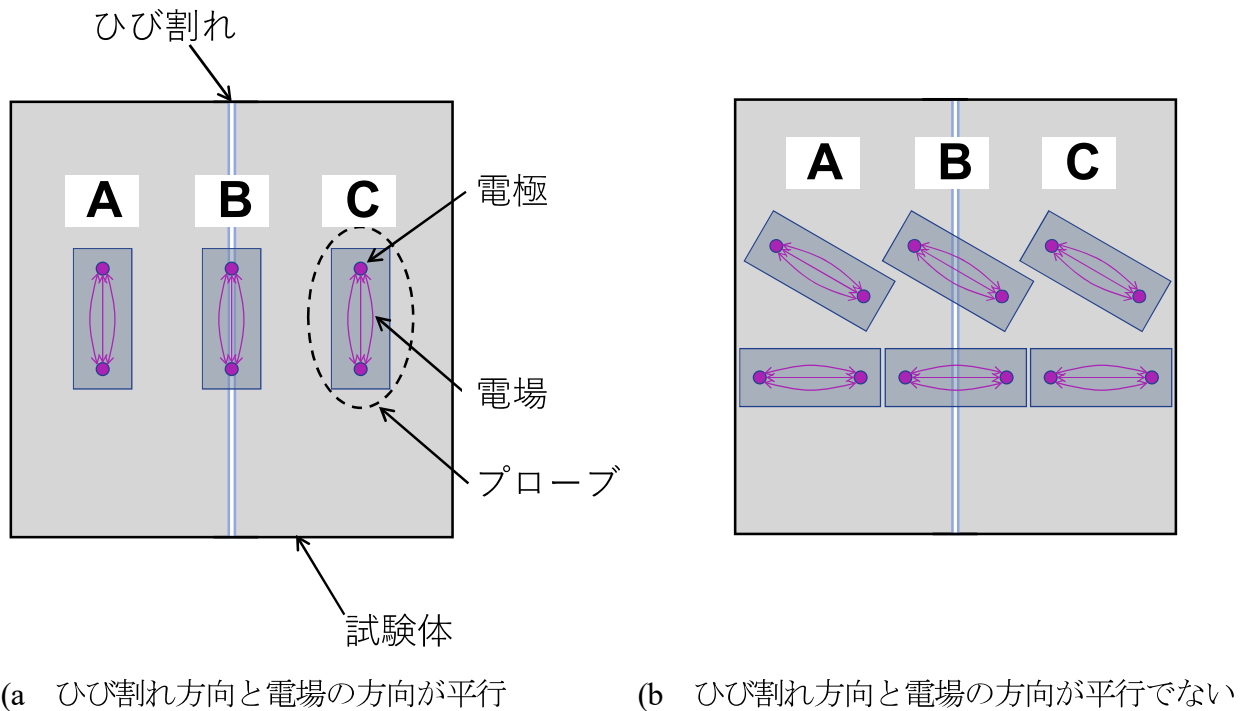


図3-4 電場の方向とひび割れの方向の関係

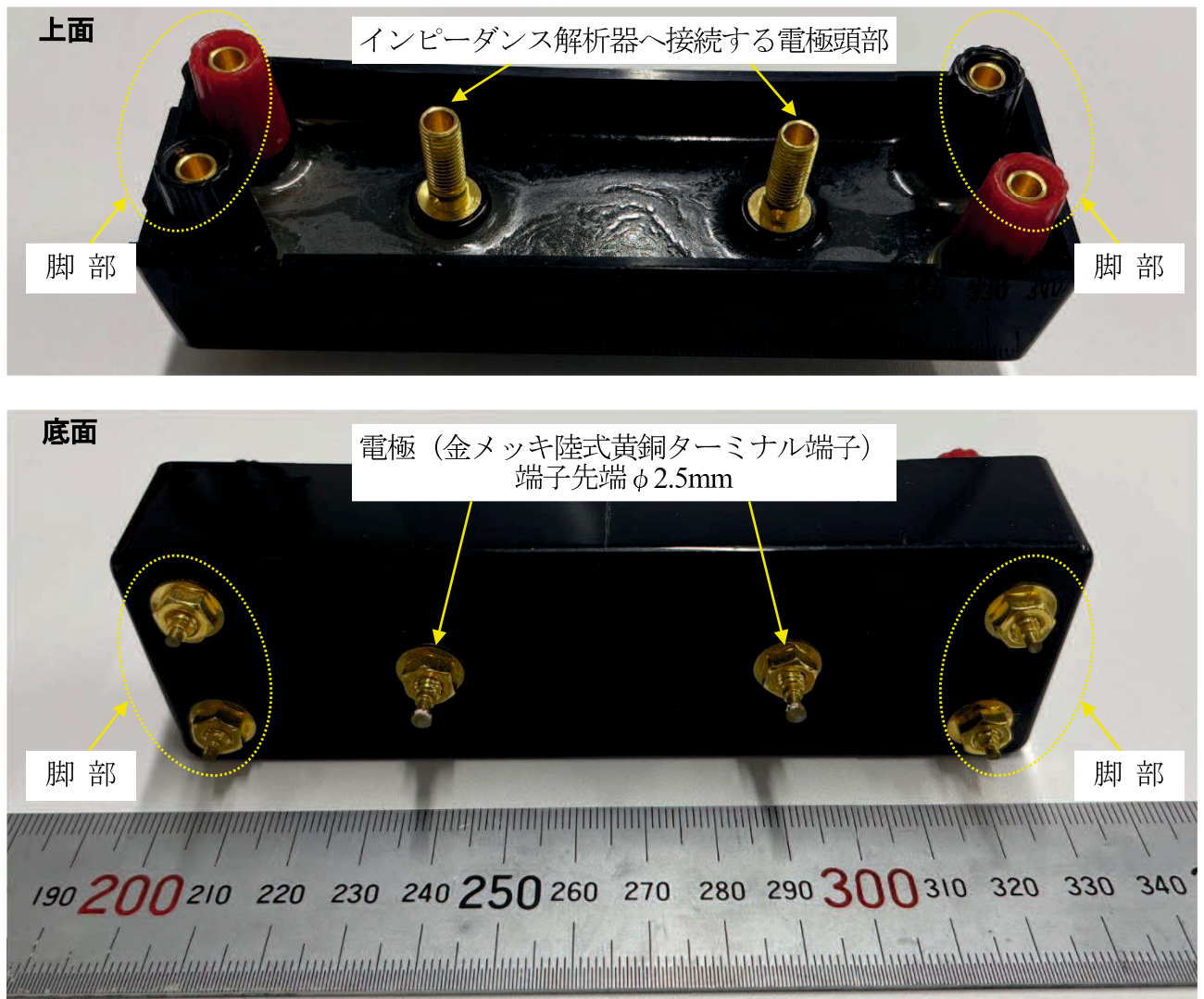


図3-5 電場を与えるプローブ

3.3 印加する交流周波数の設定

印加する交流電圧の周波数帯を設定するため、**図 3-6** に示すような人工的に設けたひび割れ（幅 1mm×深さ 50mm）を有した 200mm 立方体コンクリート試験体を作製した。人工ひび割れの開口面に対して 2 電極を有するプローブを自重により押し当て、インピーダンス解析器にてインピーダンス値と位相角を測定した。印加する交流電圧の周波数帯は、使用するインピーダンス解析器の最大レンジ幅である 1kHz から 8MHz の広帯域に設定し、プローブの位置 A, B, C のそれぞれにおけるインピーダンスと位相角を測定した。

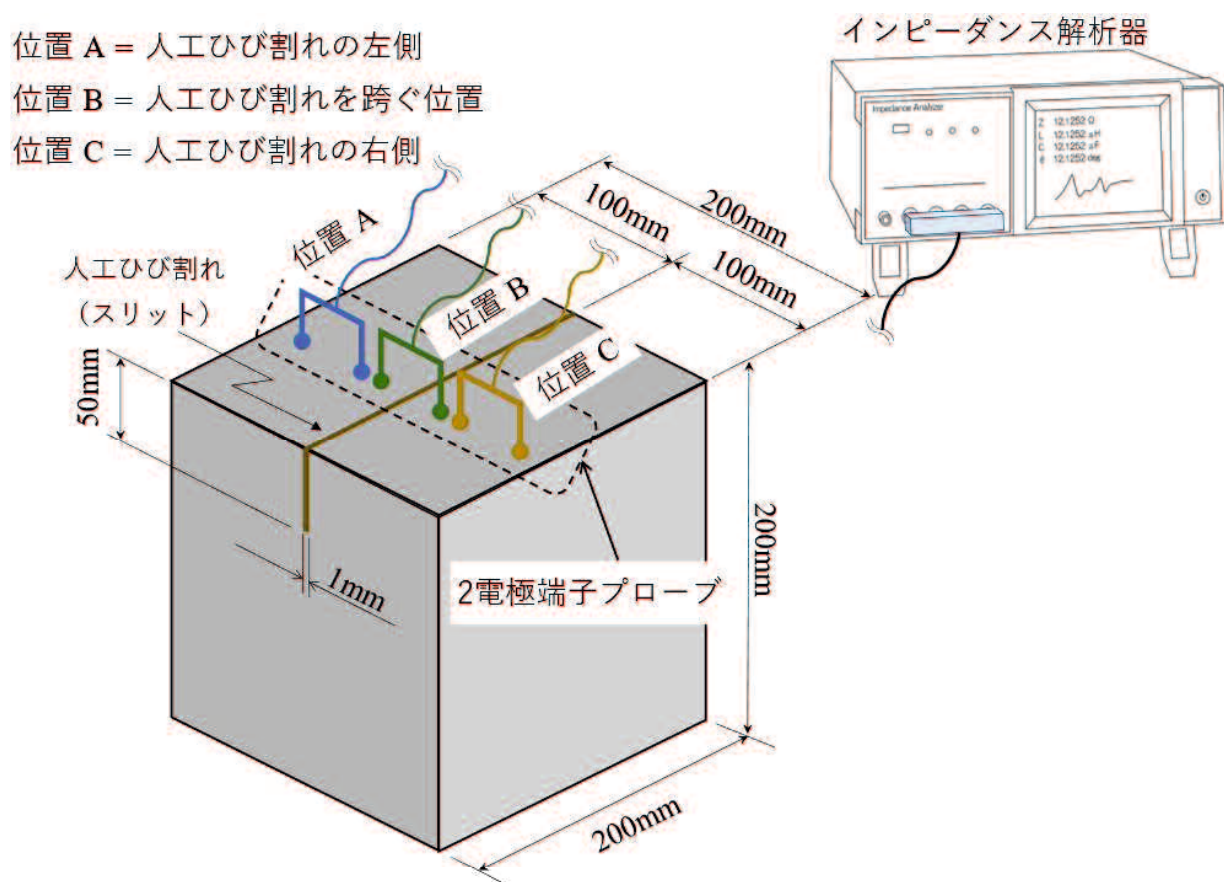


図 3-6 印加する交流周波数帯設定のための測定系

測定の結果、**図 3-7** に示すようにプローブの位置によらず、印加する電圧の周波数が高くなるにつれて一様にインピーダンスは減少し、3MHz~4MHz 付近で極大値を示すとともに、**図 3-8** に示すように位相角も負の値から正の値へと変化した。ここで、位相角が負から正に変化する現象は、試験体の電気的特性が容量性から誘導性に変化するという周波数特性を表している。本研究では、これらの結果から、測定に使用する周波数帯域を 1MHz~8MHz と設定した。

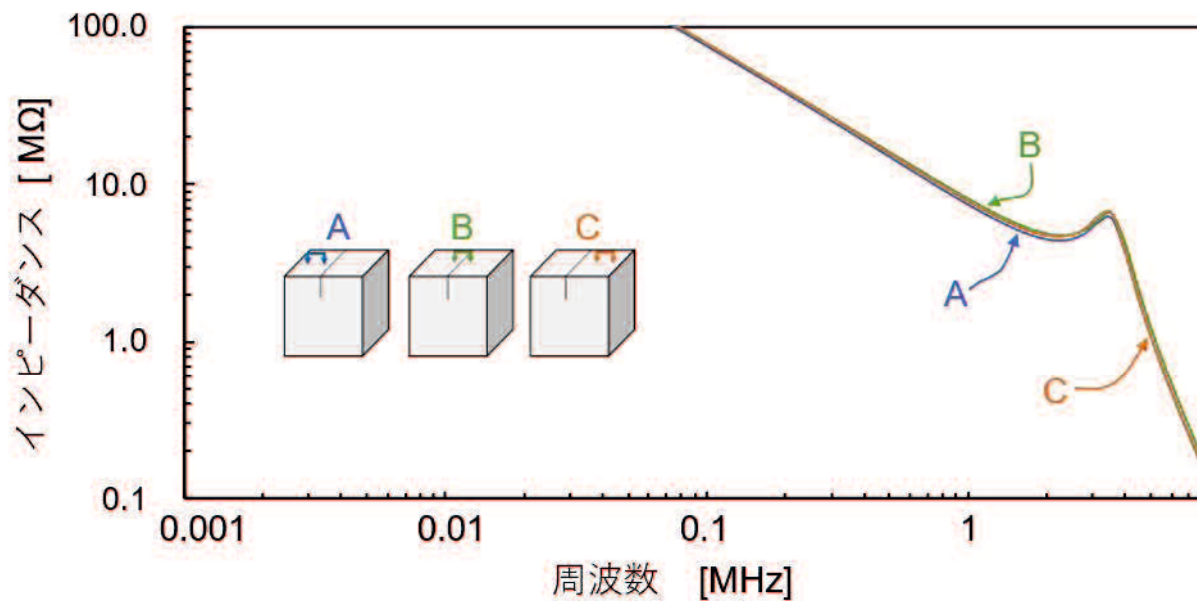


図 3-7 1kHz から 8MHz におけるインピーダンスの変化

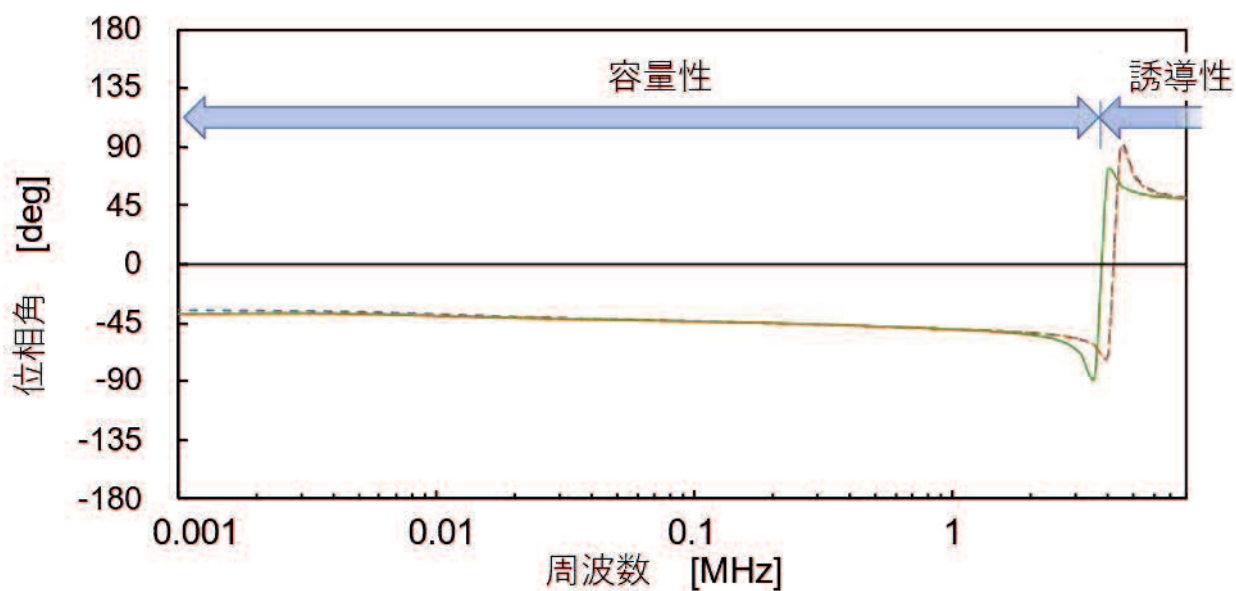


図 3-8 1kHz から 8MHz における位相角の変化

3.4 位相角およびその測定について

本研究において、インピーダンスの他に位相角という物理量も合わせて測定した。位相角とは、インピーダンス解析器内で測定される数値であり、測定系に印加された電圧と流れる電流の時間的なズレを角度で表した数値である。図3-9において、電圧波形に対して電流波形が右にシフトしているが、この場合、電流は電圧に対して位相角 θ だけ遅れていると表現する。図3-8において3MHz~4MHz付近で位相角が正にシフトしているが、この範囲の電圧と電流の時間的なズレを図3-9は表している。この電流が電圧に対して時間的に遅れている状態のことを誘導性と表し、電流が電圧に対して時間的に進んでいる状態のことを容量性と表す。

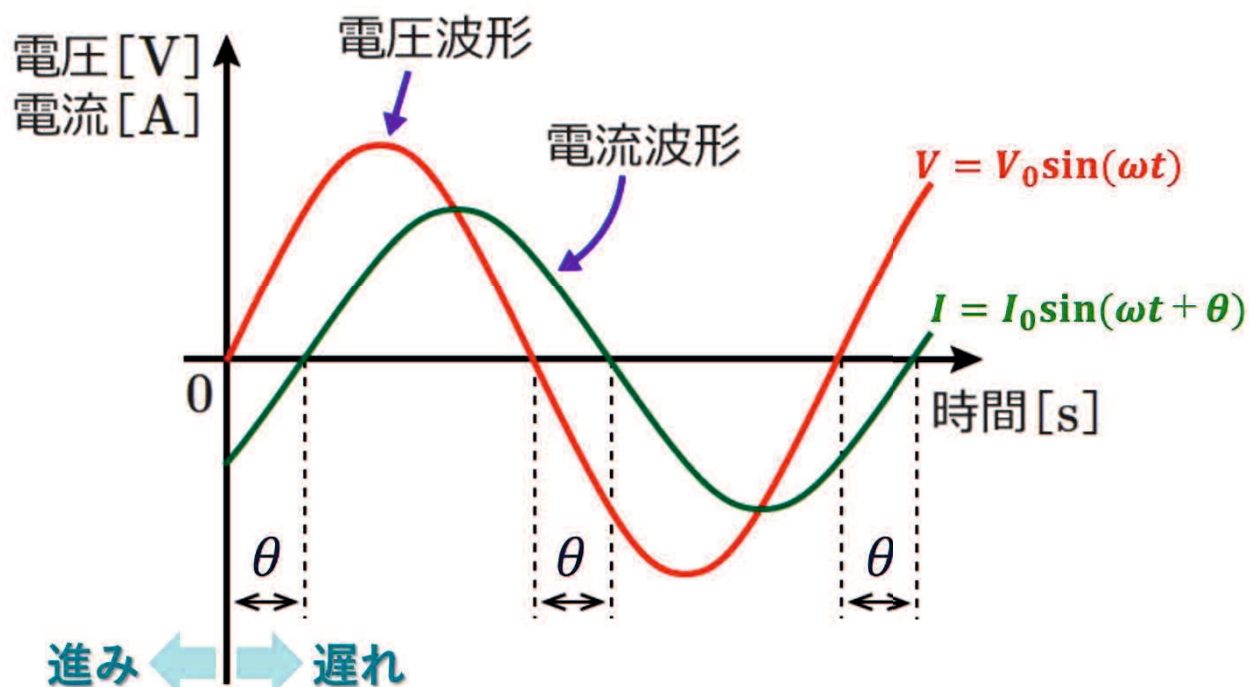


図3-9 電圧と電流の時間的關係と位相角

3.5 位相角の連続性について

図 3-8 に示すように位相角は 3MHz~4MHz 付近で負の値から正の値へと変化する現象が確認されたが、本研究の交流電圧および交流電流のように周期性のある物理量を測定した場合、測定値が測定器の設定したレンジを超えると符号が反転しジャンプしたように測定される場合がある。その場合、符号が反転した点における測定データは正負の符号が反転しているだけでデータは連続性を保っている。そこで、本測定系において、そういった現象が発生していないことを検証した。図 3-10 において位相角が正の範囲を反転させ、位相角の符号が反転した周波数の直前および直後における位相角の周波数に応じた微変化である微係数を算出した。符号が反転する直前での微係数は-60.0、符号が反転した直後での微係数は-48.5 であった。このことから、符号が反転した時の周波数の前後において測定された位相角曲線には連続性はみられない、つまり測定器のレンジ設定は適正であったことが明らかとなった。また、測定された位相角はすべて±90度以内であることから、インピーダンス解析器の校正や内部抵抗を適切に考慮した測定系であることがわかった。

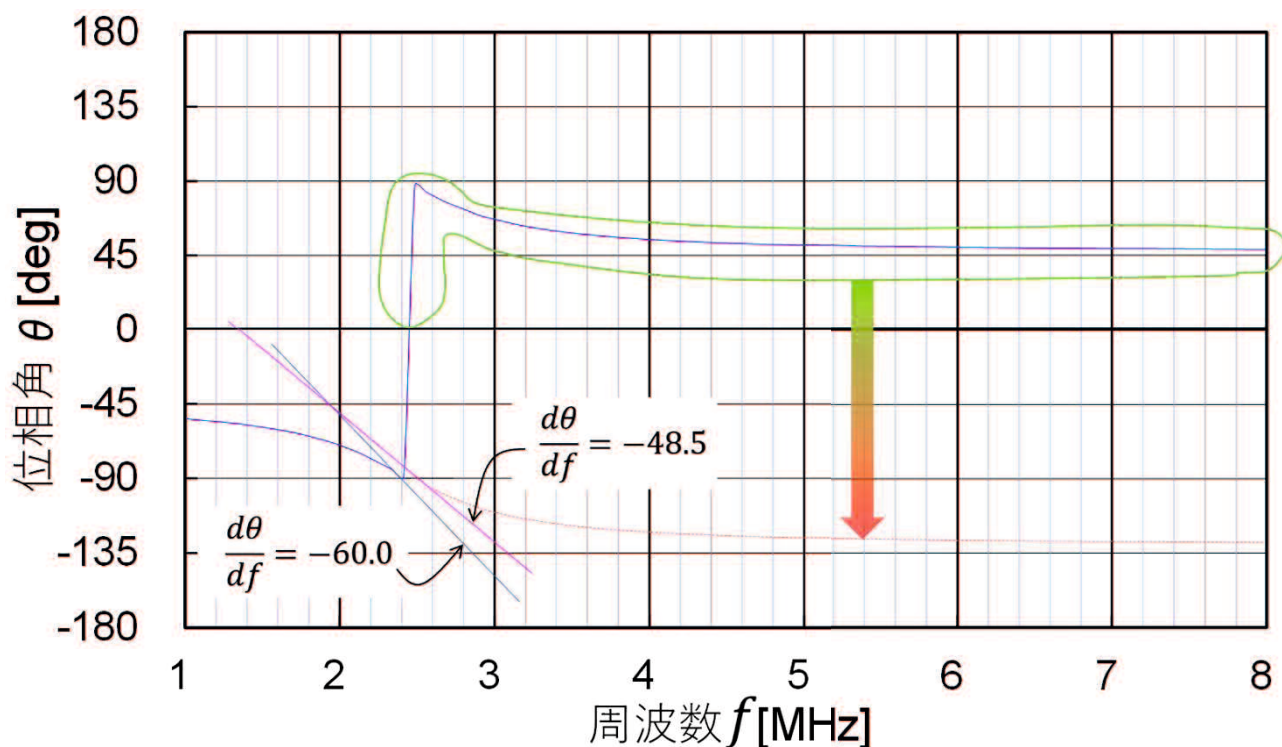


図 3-10 位相角の連続性

3.6 第3章のまとめ

第3章では、CFRPシートで被覆したコンクリートの損傷を検出するための考察プロセスを示した。そして、交流電圧を印加した状態下におけるインピーダンスおよび位相角の周波数特性の変化を捉えることで、損傷検出の可能性を窺えるに至った。また、無限に広帯な交流周波数の中からインピーダンスと位相角に特異な変化を示す周波数帯を明らかにした。以下に得られた知見を列記する。

- ・測定に使用する周波数帯域を1MHz～8MHzと設定した。
- ・ひび割れを跨ぐような電極配置，これを跨がないような電極配置によらず，印加する電圧の周波数が高くなるにつれて一様にインピーダンスは減少し，3MHz～4MHz付近で極大値を示す。
- ・ひび割れを跨ぐような電極配置，これを跨がないような電極配置によらず，印加する電圧の周波数が高くなるにつれて位相角は3MHz～4MHz付近で負から正に変化する。

【参考文献】

- 1) 蒔田鐵夫, 片山敏幸 : コンクリートの電気的特性に関する研究(1), 電気設備学会全国大会講演論文集, Vol.24, pp.233-234, 2006.
- 2) 魚本健人, 加藤佳孝 : コンクリート構造診断工学, オーム社, pp.66-77, 2008.

第4章

表面ひび割れの検出

4.1 実験目的

社会インフラのストックの取捨選択と長寿命化社会へとシフトする社会変化に対応して、既存コンクリート構造物の耐震補強に FRP シートで表面を覆う工法が多く採用されるようになってきている。表面が FRP シート補強されたコンクリート構造物が被災する可能性もあり、その被災程度を評価することが必要になってくる。架構が大きく変わるといった目視確認できる場合を除いても、表面が FRP 補強された中身の損傷を確認することも今後必要になると予想される。現在まで、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信号を構造物内部に作用させ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。表面を FRP シートで覆われたコンクリート構造物では、有効に物理的信号を内部に伝達させることも、内部からの信号に対する反応情報も得ることができず、内部劣化の度合い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なされているが、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みられない。

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 (主にひび割れ) を検出するため、表面を覆っている CFRP シートや AFRP シート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、この特性を用いてひび割れを検出する非破壊試験手法を提案した。

4.2 使用材料と試験体作製

表 4-1 に示すように被覆材の種類（炭素繊維 CF，アラミド繊維 AF），および人工的に設けたひび割れ（幅 1mm×深さ 30mm，50mm，100mm）により 6 種類の 200mm 立方体コンクリート試験体を作製した（図 4-1）。人工ひび割れはコンクリート打設前にセットしておいた厚さ 1mm のステンレス板を型枠脱型と併せてコンクリート打設後に撤去することで製作した。コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表 4-2 に示す。

表 4-1 試験体パラメータ

| 試験体記号 | ドライシート素材 | ドライシート厚 t | 目付量 | ひび割れ深さ d |
|------------|----------|-------------|---------------------|------------|
| TPN000-030 | non | — | — | 30mm |
| -050 | | | | 50mm |
| -100 | | | | 100mm |
| TPC167-050 | CF | 0.167mm | 313g/m ² | 50mm |
| TPC333-050 | | 0.333mm | 629g/m ² | |
| TPA286-050 | AF | 0.286mm | 415g/m ² | |

表 4-2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

| W/C % | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|--|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | セメント ※1 | 水 | 粗骨材 ※2 | 細骨材 ※3 | 混和剤 ※4 |
| 56.5 | 305 | 172 | 977 | 838 | 3.81 |
| スランプ | | 14.5cm | | 空気量 | 5.4% |
| ※1：普通ポルトランド 密度=3.16g/m ³ ，Na ₂ Oeq=0.68% ※2：種類Ⅰ 砕石（珪岩） 産地=栃木県佐野市 実績率=60.0%，表乾密度=2.64g/cm ³ 種類Ⅱ 砕石（石灰岩）産地=栃木県佐野市 実績率=60.0%，表乾密度=2.70g/cm ³ ※3：種類ⅰ 砕砂（珪岩） 産地=栃木県佐野市 粗粒率=3.00，表乾密度=2.60g/cm ³ 種類ⅱ 砕石（石灰岩） 産地=栃木県佐野市 粗粒率=3.00，表乾密度=2.66g/cm ³ 種類ⅲ 陸砂（細砂） 産地=千葉県香取市 粗粒率=1.80，表乾密度=2.60g/cm ³ ※4：AE 減水剤（遅延型）， Na ₂ Oeq=1.4% | | | | | |

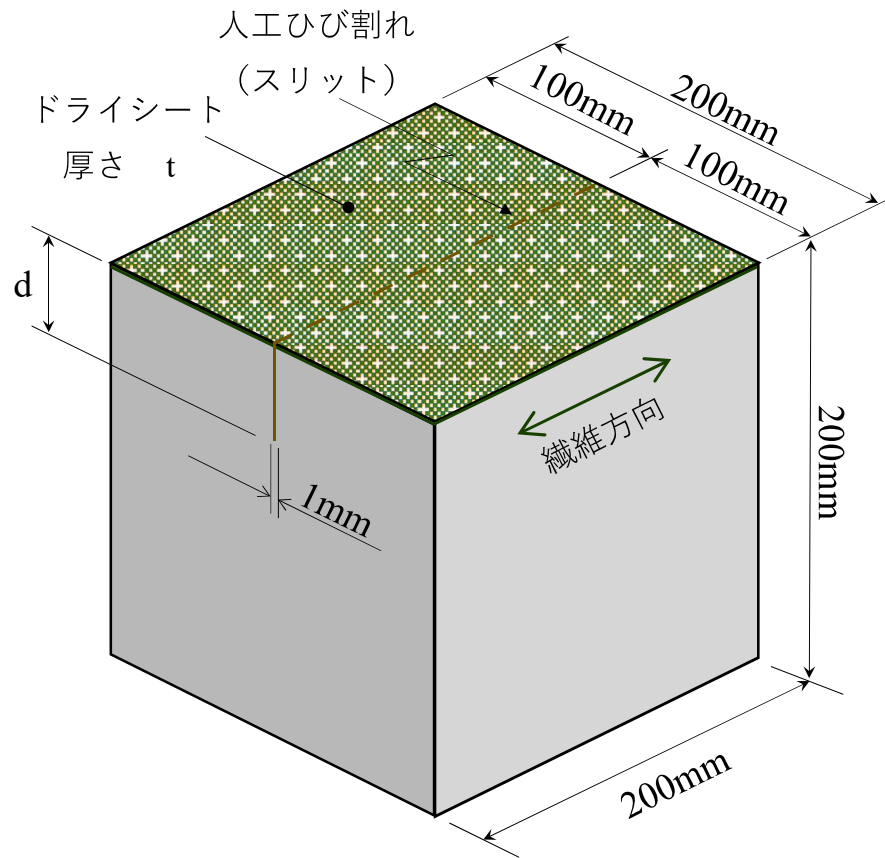


図4-1 試験体の模式図

コンクリート打設3日後に型枠脱型し、28日の20℃気中養生期間を経た後、被覆材を貼り付ける面の含水率をコンクリート中の水分により誘電率の変化を測定する含水率計で測定したところ、8%以下であった。また、試験体コンクリート打設と同時に作製した同寸法の試験体について、JIS A 1476に準じて測定した含水率は、質量基準質量含水率0.042 kg/kg、体積基準質量含水率0.093 kg/m³であった。含水率の確認後、被覆する面の下地処理を施し、プライマー塗布、パテ処理を施した後、人工ひび割れ側表面に厚さ0.167 mm、0.333 mmの炭素繊維（ドライ）シートと、厚さ0.286 mmのアラミド繊維（ドライ）シートをエポキシ樹脂接着剤（含侵樹脂）にて接着被覆した。なお、プライマーとパテおよび含侵樹脂は刷毛塗り、繊維（ドライ）シートはローラーにて含侵樹脂を染み込ませた（図4-2）。人工ひび割れ部分には1 mmのステンレス板を改めて差し込んでおき、パテ硬化前に引き抜くことで、樹脂の流入を防いだ。ここで、多くのFRPシートで補強されたコンクリート構造物のひび割れは、繊維に平行な方向に生じることから、本実験では、ドライシートの繊維方向は人工ひび割れ方向と同じとした。なお比較・確認のため、FRPシート被覆をしない、ひび割れ深さが30 mm、50 mm、100 mmの基準試験体もあわせて作製した。

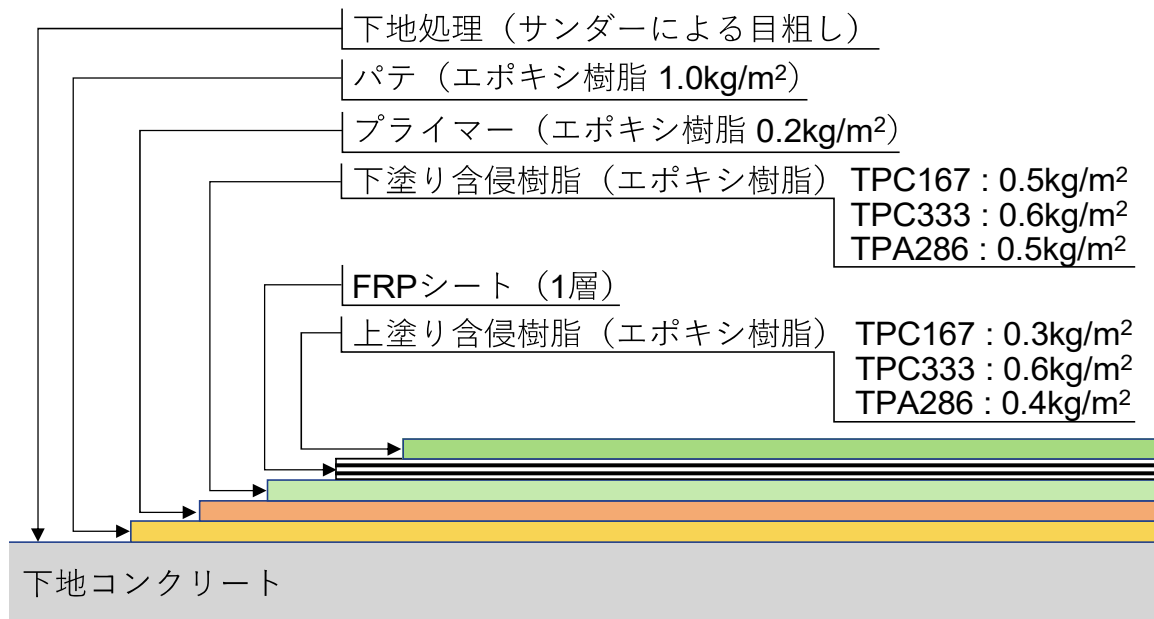


図4-2 FRP シートの積層構成

4.3 実験方法

電極間に様々な周波数の電圧 1 V ($2.82\text{ V}_{\text{p-p}}$) の交流電圧を印加したときのインピーダンスと位相角を PC 制御下のインピーダンス解析器を用いて測定した。なお、同じ測定点での測定は、周波数ごとに十分な時間間隔をおいて5回連続して測定し、インピーダンス解析器内部にて平均化された数値（誤差はインピーダンス確度： $\pm 0.05\% \text{ rdg}$ ，位相角確度： ± 0.03 度）を，その測定点における測定値として評価した。

ここでインピーダンスとは交流電圧を印加した時の電圧と電流の関係で定義されるパラメータで，振幅と位相の二つの要素を持ち合わせたベクトルである。位相は印加した交流電圧に対する電流の時間的ズレ量を角度で表す。なお，振幅は一般的にインピーダンスと呼ばれることから，以後は振幅をインピーダンスと表記する。

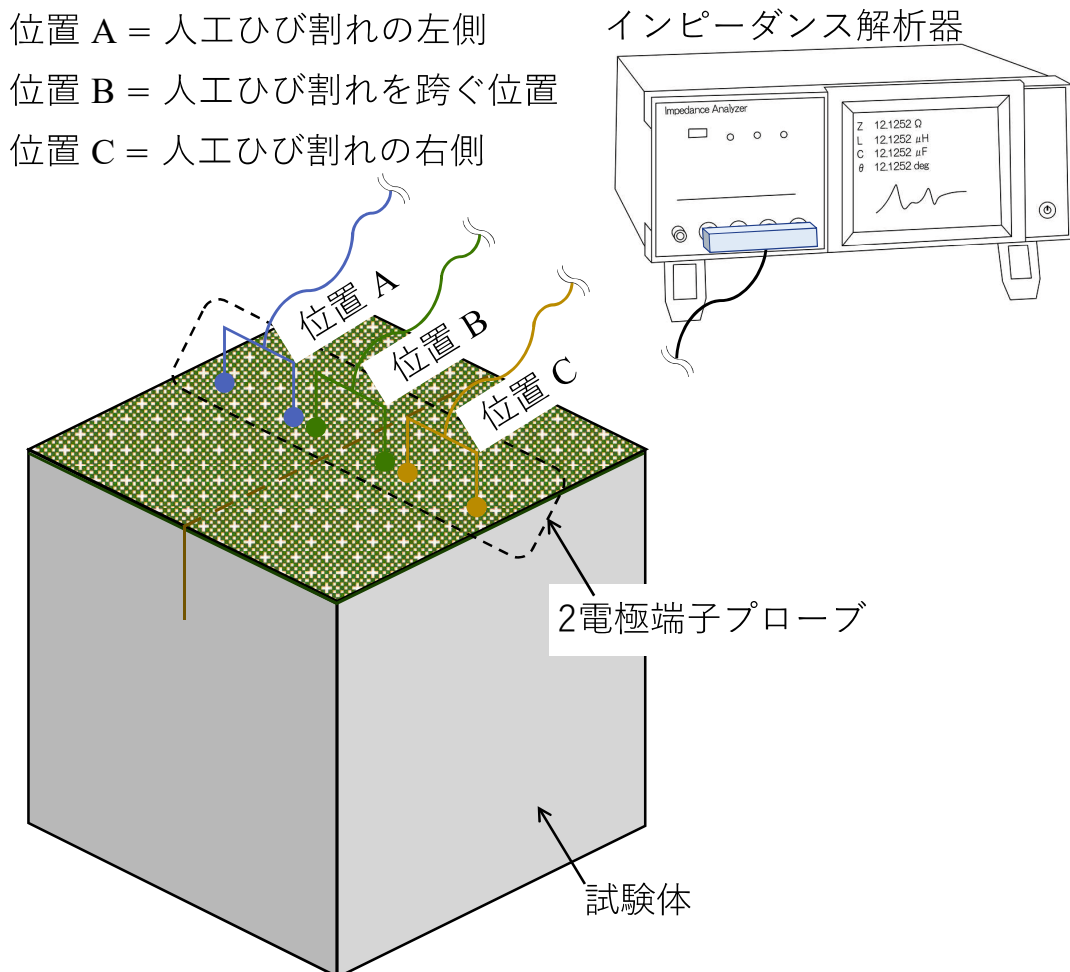


図 4-3 インピーダンス測定位置

インピーダンスおよび位相角の測定を、**図4-3**に示す3つのプローブ位置、人工ひび割れの左位置(A)と右位置(C)、人工ひび割れを跨ぐ位置(B)で**図4-4**に示す2電極端子(端子間距離50mm固定)を有するプローブをFRPシート表面に直接プローブ自重により押し当て測定した。第3章の結果に基づいて、印加する交流電圧の周波数帯を1MHzから8MHzに設定し、インピーダンスと位相角の測定した。なお、本測定系では様々な影響要因をできるだけ小さくするため、ひび割れを跨いだ位置Bでの測定値に加え、同じ試験体において、ひび割れを跨がない位置A・Cでの測定値を、ひび割れを導入していない場合の測定値とみなして比較することとした。

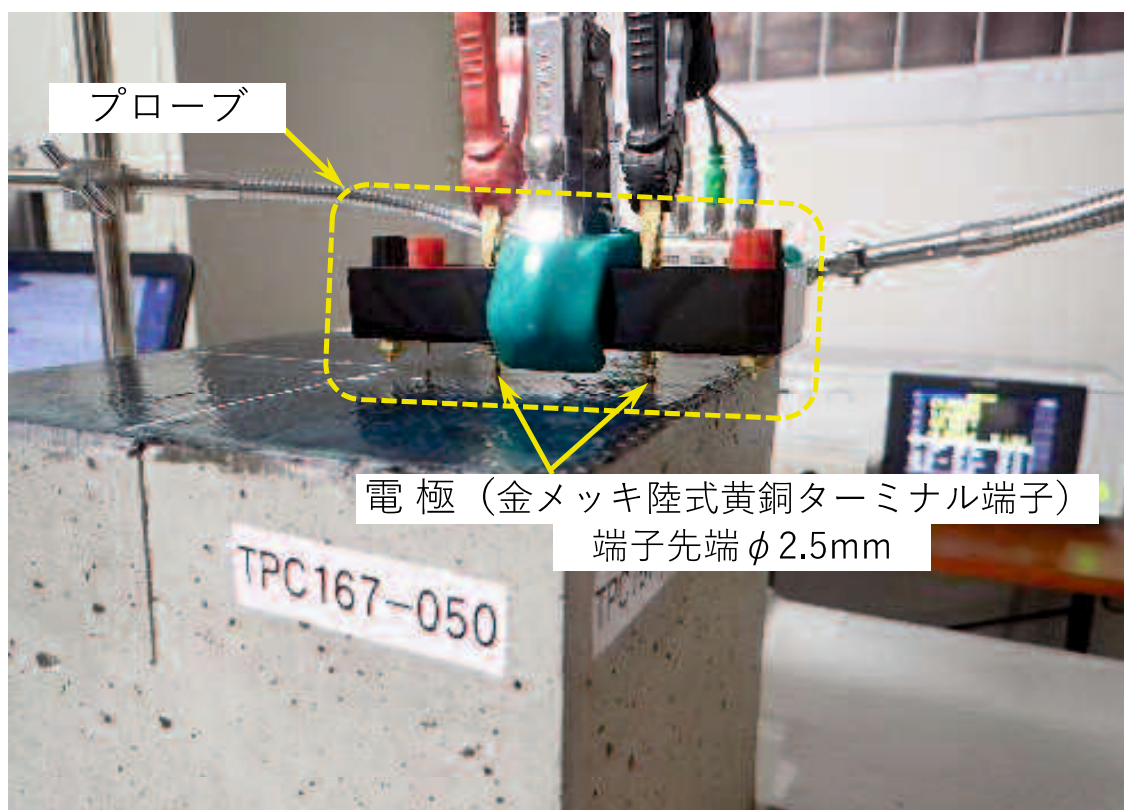


図4-4 プローブ

4.4 ひび割れ深さと周波数特性の変化

周波数帯域 1 MHz～8 MHz の交流電圧を印加した状態で、FRP シートで被覆していない人工ひび割れ深さが異なる 3 種類の試験体 (TPN000-030 ; TPN000-050 ; TPN000-100) のインピーダンスおよび位相角の周波数特性を測定した。

(1) インピーダンスの周波数特性

各インピーダンスの周波数特性を図 4-5～図 4-7 に示す。いずれの試験体においても 3 MHz～4 MHz 付近でインピーダンスの極大値を示した。また、インピーダンスは人工ひび割れをプローブで跨ぐ配置 (位置 B) にした時に高い数値を示すこともわかった。一方、位置 B におけるインピーダンス極大値と人工ひび割れの深さの関係性については、人工ひび割れ深さに応じてインピーダンス極大値が大きくなるといったような線形性はみられず、表 4-3 に示すように、ひび割れ深さに依らず概ね同等のインピーダンス極大値が得られた。また、インピーダンスが極大値を示す時の周波数も人工ひび割れの深さとは線形性はみられなかった。

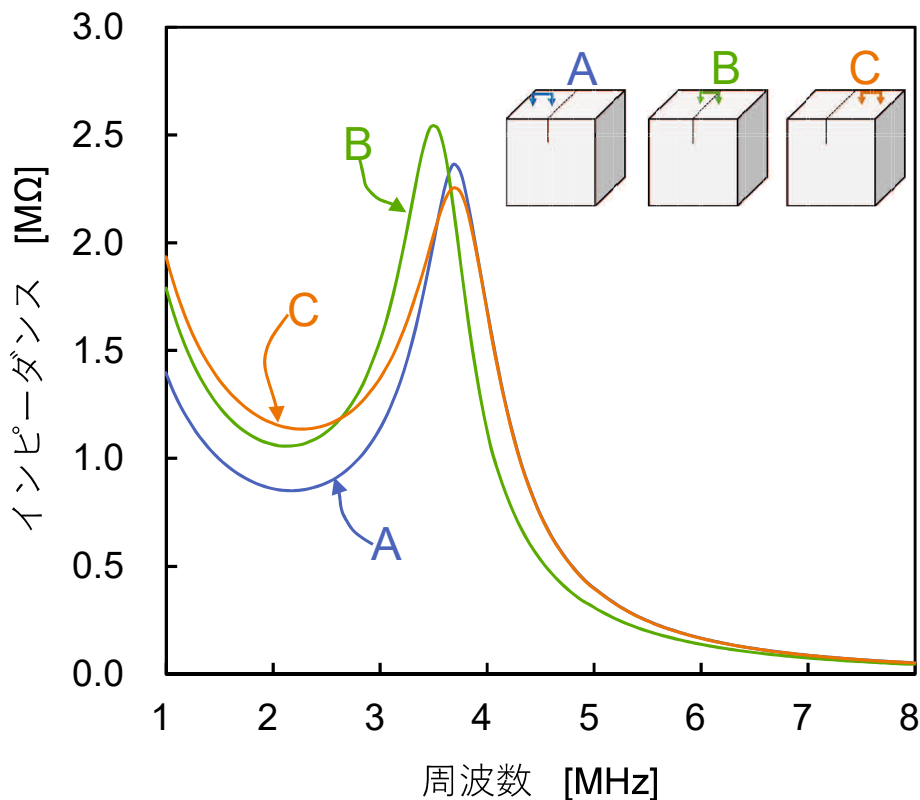


図 4-5 インピーダンス周波数特性 (ひび割れ深さ 30 mm)

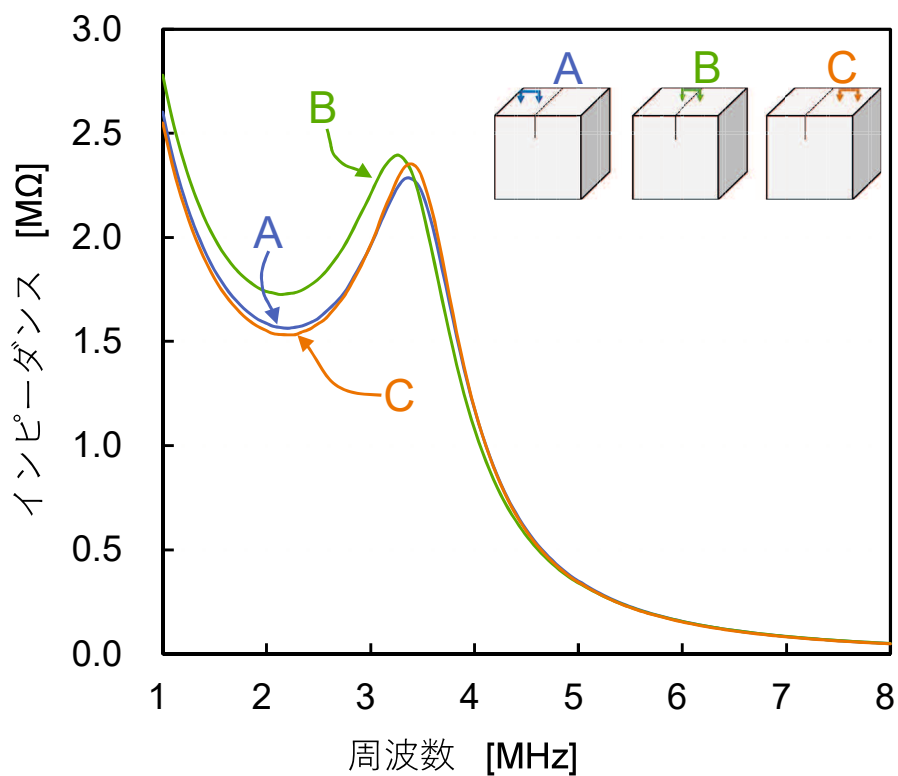


図4-6 インピーダンス周波数特性（ひび割れ深さ 50 mm）

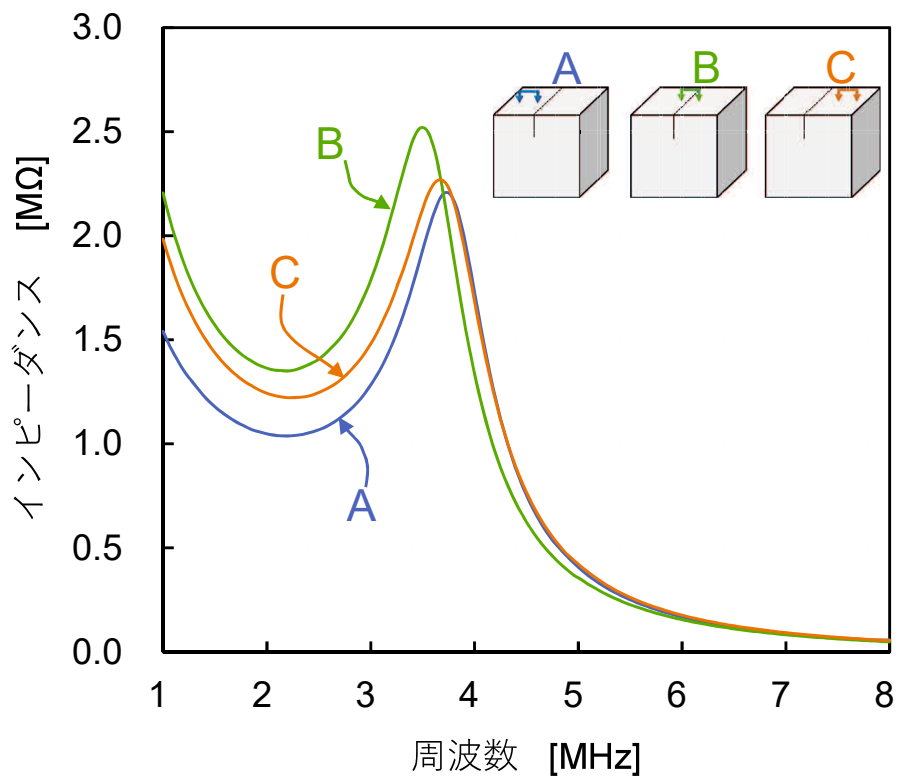


図4-7 インピーダンス周波数特性（ひび割れ深さ 100 mm）

表 4-3 ひび割れ深さとインピーダンス極大値

| ひび割れ深さ | 30 mm | 50 mm | 100 mm |
|-------------------------------|-------|-------|--------|
| インピーダンス 極大値 [MΩ] | 2.54 | 2.40 | 2.52 |
| インピーダンスが極大値を 示す時の周波数 [MHz] | 3.47 | 3.26 | 3.47 |

(2) 位相角の周波数特性

同様に、各位相角の周波数特性を図4-8～図4-10に示す。これらの結果に示すように、いずれの試験体においても3～4MHz付近で位相角が負から正へと変化した。また、位相角の負から正へ変化する時の周波数（位相変位周波数）は、人工ひび割れをプローブで跨ぐ配置（位置B）にした時の方が、位置Aおよび位置Cの変位周波数よりも低い数値を示すこともわかった。一方、位置Bにおける変位周波数と人工ひび割れの深さについては、インピーダンスの極大値の結果と同様に、明瞭な関連性はみられなかった（表4-4）。

このことから、本研究で示した方法で、インピーダンスと位相角の変化によりひび割れの有無を検出できる可能性はみられるが、ひび割れ深さまで求めることは困難であることがわかった。そこでFRPシートで被覆したコンクリートの試験では、ひび割れ深さ50mmの試験体（TPC167-050；TPC333-050；TPA286-050）を対象にして、FRPシート被覆下にあるひび割れによるインピーダンス変化および位相角の変化を調べることにした。

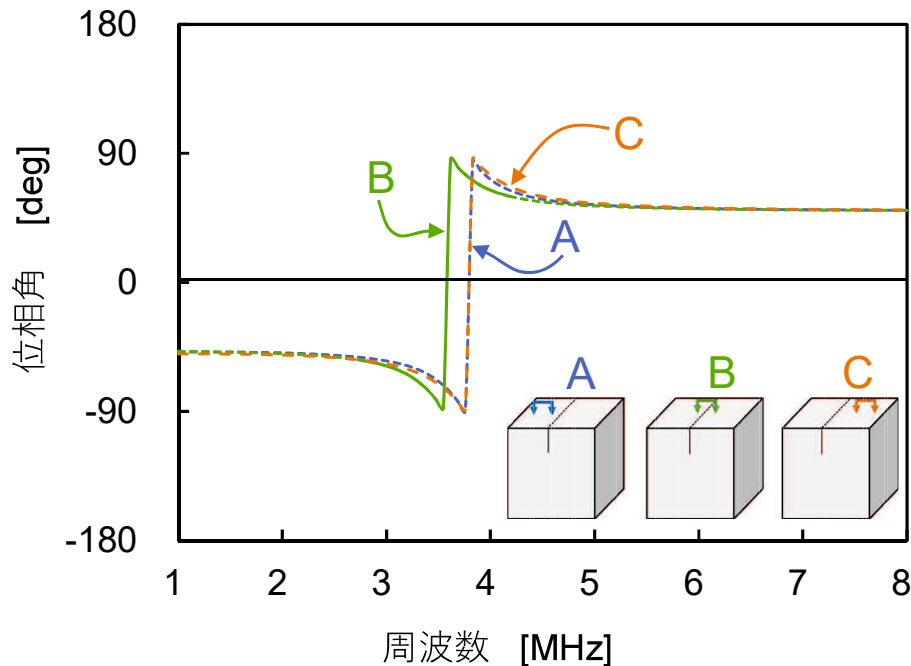


図4-8 位相角周波数特性（ひび割れ深さ30mm）

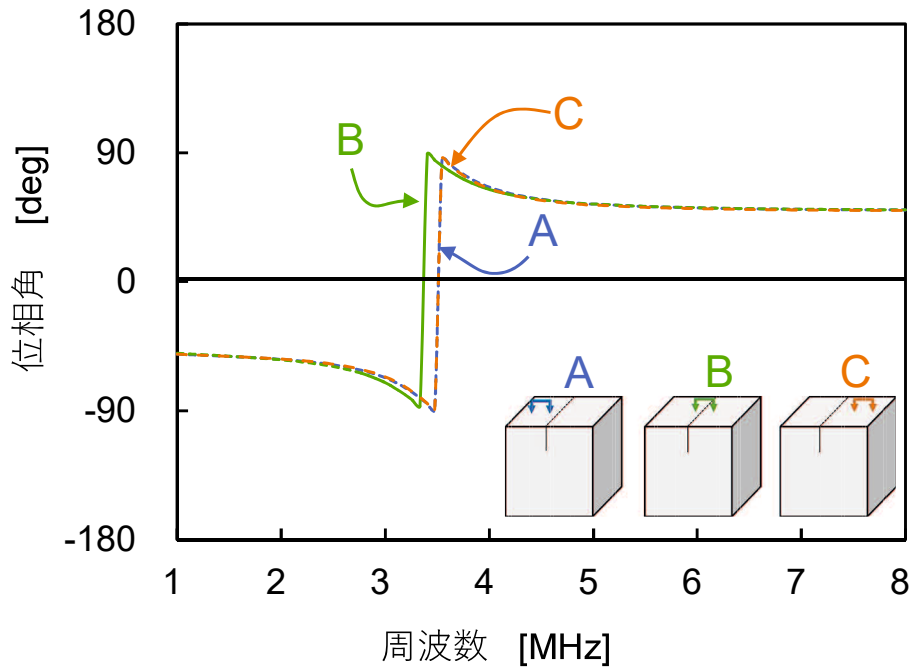


図4-9 位相角周波数特性（ひび割れ深さ 50 mm）

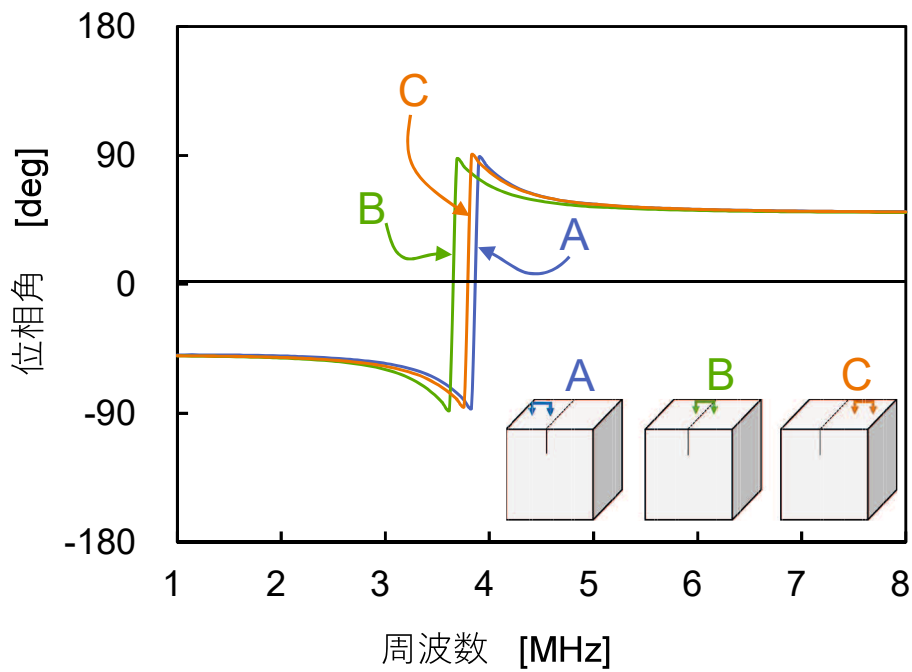


図4-10 位相角周波数特性（ひび割れ深さ 100 mm）

表 4-4 ひび割れ深さと位相変位周波数

| ひび割れ深さ | 30 mm | 50 mm | 100 mm |
|---------------|-------|-------|--------|
| 位相変位周波数 [MHz] | 3.59 | 3.37 | 3.66 |

4.5 FRP 被覆コンクリートのインピーダンス変化

深さ 50 mm の人工ひび割れを設けた FRP シート被覆材が異なる 3 つの試験体 (TPC167-050 ; TPC333-050 ; TPA286-050) を対象に, 周波数 1 MHz~8 MHz の交流電圧を印加した際のインピーダンス変化を調べた。

コンクリート表面をドライシート厚 0.167 mm および 0.333 mm の CFRP シートで被覆した試験体におけるインピーダンス周波数特性を, それぞれ図 4-11, 図 4-12 に示す。また, 表面をドライシート厚 0.286 mm の AFRP シートで被覆した試験体のインピーダンス周波数特性を図 4-13 に示す。

これらの結果に示すように, CFRP・AFRP シートで被覆しても, 被覆していない基準試験体と同様に, 3 MHz~4 MHz 付近で極大値を示した。各試験体で得られたインピーダンスの極大値とその時の周波数を表 4-5 にまとめて示す。いずれの試験体においても, 人工ひび割れをプローブで跨ぐ配置 (位置 B) にした時の方が, 人工ひび割れの左右 (位置 A, 位置 C) におけるインピーダンス極大値よりも大きく, その時の周波数が低いことがわかった。

ここで位置 B におけるインピーダンス極大値について, 被覆材の種類で比較すると, 2.67 MΩ を示した AFRP シートの方が CFRP シート (1.61 MΩ・2.02 MΩ) よりも明らかに高いインピーダンス値を示し, これはひび割れのない位置 A・C においても同様の傾向がみられた。また同じ CFRP シートの被覆であっても, ドライシート厚さが 0.167 mm では 1.61 MΩ, 0.333 mm では 2.02 MΩ となり, 用いる炭素繊維ドライシートの厚さにより高いインピーダンス値を示すことがわかった。

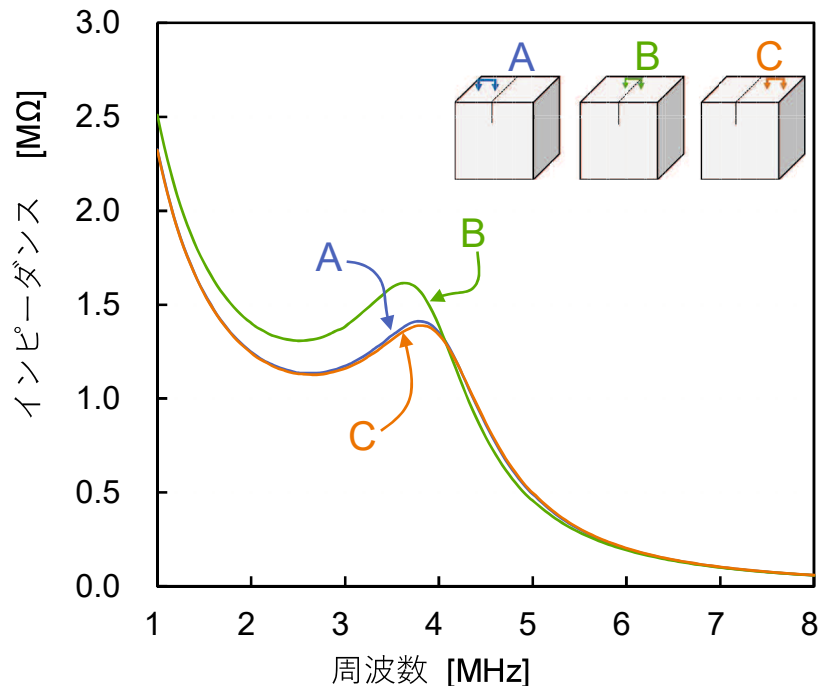


図 4-11 TPC167-050 のインピーダンス周波数特性

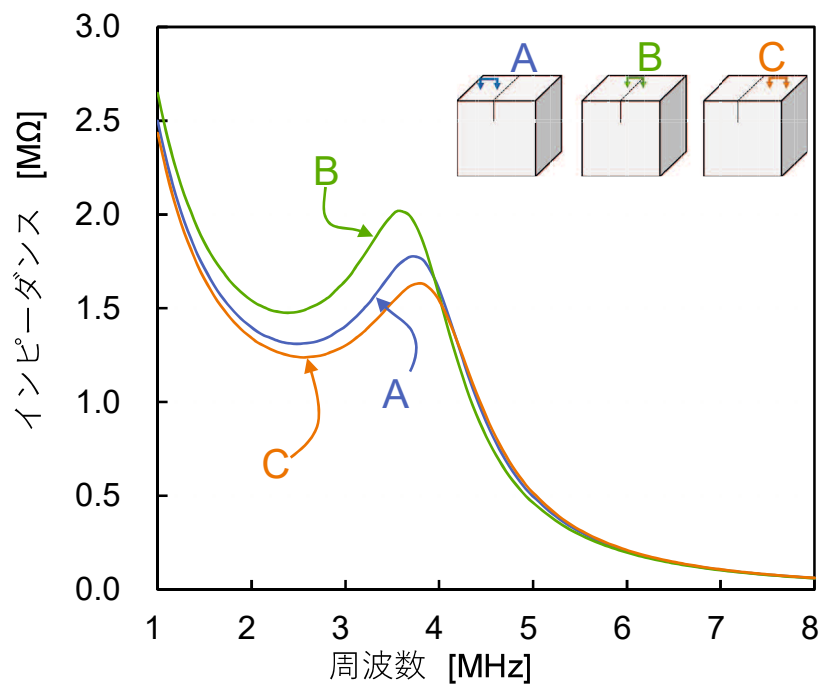


図4-12 TPC333-050のインピーダンス周波数特性

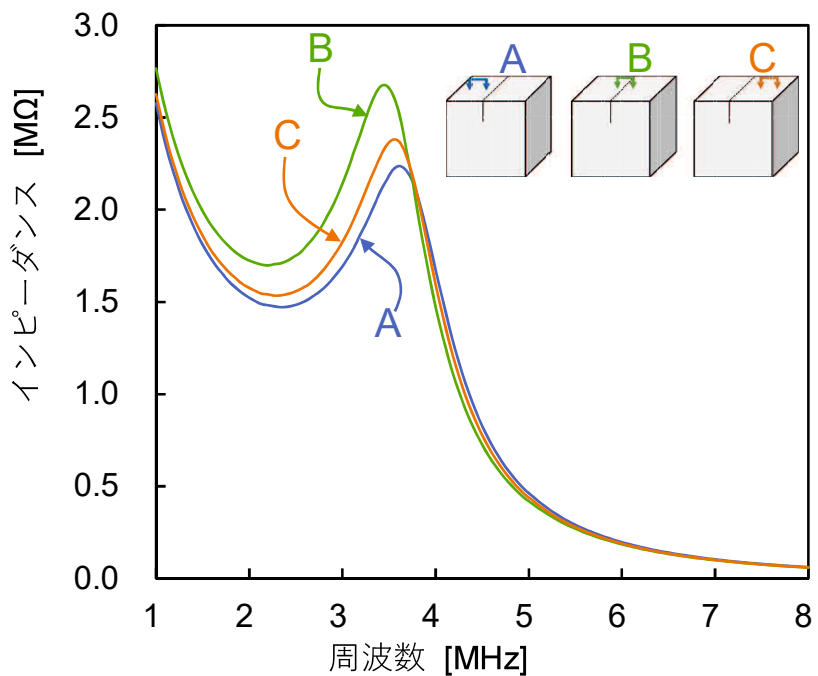


図4-13 TPA286-050のインピーダンス周波数特性

表 4-5 インピーダンス極大値

| 試験体記号 | プローブのひび割れに対する位置 | | |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 左 (A) | 直上 (B) | 右 (C) |
| TPC167-050 | 1.41 [MΩ] (3.76 [MHz]) | 1.61 [MΩ] (3.62 [MHz]) | 1.39 [MΩ] (3.83 [MHz]) |
| TPC333-050 | 1.77 [MΩ] (3.76 [MHz]) | 2.02 [MΩ] (3.55 [MHz]) | 1.63 [MΩ] (3.83 [MHz]) |
| TPA286-050 | 2.24 [MΩ] (3.62 [MHz]) | 2.67 [MΩ] (3.47 [MHz]) | 2.38 [MΩ] (3.55 [MHz]) |

※表中上段数値はインピーダンス極大値を示し，下段数値はその時の周波数を示す

4.6 FRP 被覆コンクリートの位相角変化

深さ 50mm の人工ひび割れを設けた被覆材が異なる 3 つの試験体 (TPC167-050 ; TPC333-050 ; TPA286-050) について、周波数 1 MHz ~ 8 MHz の交流電圧を印加した際の位相角変化を調べた。

コンクリート表面をドライシート厚 0.167 mm および 0.333 mm の CFRP シートで被覆した試験体、およびドライシート厚 0.286 mm の AFRP シートで被覆した試験体における位相角の周波数特性を、それぞれ図 4-14 ~ 図 4-16 に示す。インピーダンスの極大値がみられた 3 MHz ~ 4 MHz 付近で、位相角が負から正へと変化した。これは被覆をしていない基準試験体と同様の傾向である。さらに位相角について正負の変化がみられたときの周波数を表 4-6 にまとめて示す。いずれの試験体においても、人工ひび割れをプローブで跨ぐ配置 (位置 B) にした時の方が、人工ひび割れの左右 (位置 A, 位置 C) の位相変位周波数よりも低いことがわかる。

位置 B における位相変位周波数については、CFRP シートで被覆した試験体 (3.79 MHz・3.72 MHz) より、AFRP シートの方が低い位相変位周波数 (3.58 MHz) を示した。また同じ CFRP シート被覆の場合では、炭素繊維ドライシート厚さが厚い方が低い位相変位周波数を示すことがわかった。

FRP シートで被覆したコンクリートのインピーダンスと位相変位周波数の特性についてまとめると、AFRP シートの方が CFRP シートより顕著な特性を示し、また炭素繊維ドライシートの厚さによっても特性が異なることがわかった。

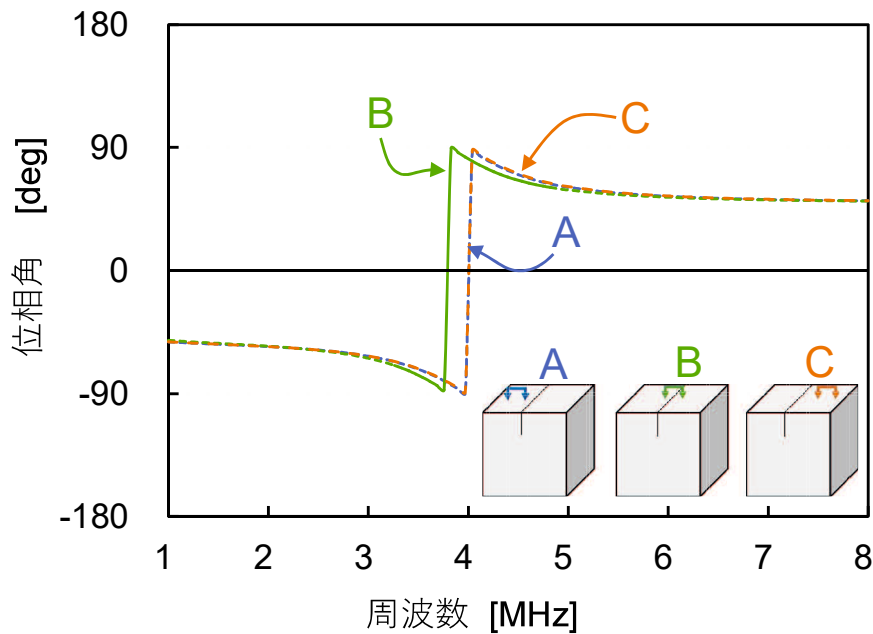


図 4-14 TPC167-050 の位相角周波数特性

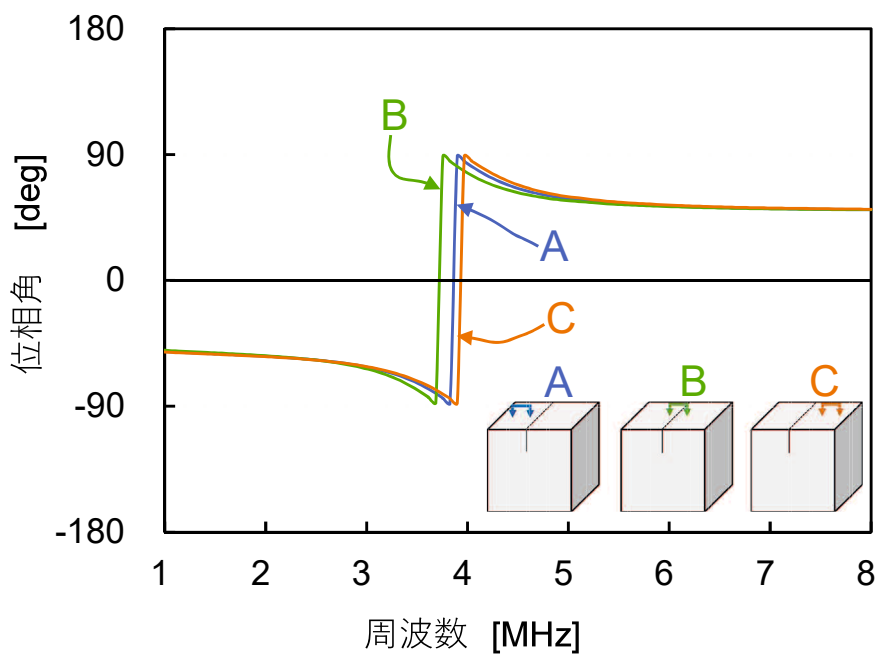


図 4-15 TPC333-050 の位相角周波数特性

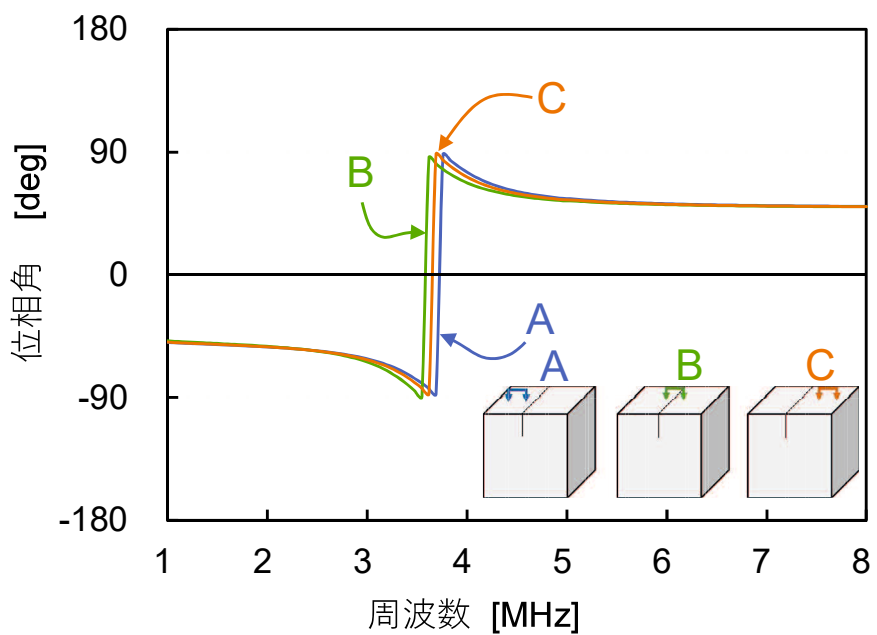


図 4-16 TPA286-050 の位相角周波数特性

表 4-6 位相変位周波数

| 試験体記号 | プローブのひび割れに対する位置 | | |
|------------|-----------------|------------|------------|
| | 左 (A) | 直上 (B) | 右 (C) |
| TPC167-050 | 4.01 [MHz] | 3.79 [MHz] | 4.01 [MHz] |
| TPC333-050 | 3.86 [MHz] | 3.72 [MHz] | 3.93 [MHz] |
| TPA286-050 | 3.72 [MHz] | 3.58 [MHz] | 3.65 [MHz] |

4.7 実験結果に対する考察

(1) ひび割れ深さとインピーダンス極大値および位相変位周波数の相関性

実験結果から、周波数 1 MHz～8 MHz の交流電圧を印加した際の、インピーダンス極大値と位相角変位周波数の変化を捉えることで、目視では確認できない FRP シート被覆直下のひび割れを検出できることが窺えた。しかし、人工ひび割れ深さが 30 mm～100 mm と異なる FRP シート被覆していない試験体においても、ひび割れ深さを求めることができなかった。これは交流電流が導体を流れる際の「表皮効果」^{2),3)}に類似した現象が、誘電体であるコンクリートにも起こったためと考えられる。ここで「表皮効果」とは、電流密度が導体の表面で高く、表面から離れると低くなる現象であり、「表皮深さ」という数値で表される。電流が表面電流の $1/e$ (約 0.37) になる「表皮深さ」は、抵抗率が小さいほど、周波数が高いほど、透磁率が大きいほど小さくなる。ここで、印加する交流電圧の周波数が高くなると、コンクリートのインピーダンスが小さくなりみかけ上抵抗率が小さく導体の性質に近くなるため、表皮深さが小さくなる。すなわち、電流の流れが表面に集中したためと考えられる。

さらに、2つのプローブ端子間に形成される電場の影響範囲が表層に偏っていることも原因のひとつと考えられる。人工ひび割れの深さ 30 mm, 50 mm, 100 mm において、インピーダンスおよび位相角の周波数特性の間に相関性がなかったことから、電流が集中した表層厚は、少なくとも 30 mm 未満と推定できる。

(2) ひび割れ位置と測定位置との関係性

人工ひび割れを跨ぐ位置で測定されたインピーダンスが、ひび割れがない位置で測定されたインピーダンスよりも高くなった結果について考察する。

コンクリート内部は図 4-17 の模式図で示すように、電気的に水分子に代表される有極性分子と、非極性分子とで構成されている。コンクリート中に電場が作用すると、電場方向に有極性分子が向きを揃える。すなわち、コンクリートは比誘電率 ϵ_{rc} (6～10) の誘電体と考えることができる。そこに空気層とみなされるひび割れが含まれる場合、空気は誘電分極しないので、空気の比誘電率 ϵ_{rA} は1とコンクリートの比誘電率 ϵ_{rc} に対して著しく小さい。そのため、ひび割れを内在するコンクリートの比誘電率 ϵ_{rc} は、ひび割れがない場合の比誘電率 ϵ_{rc} よりも小さくなる傾向にある。

比誘電率が小さくなるということは、誘電分極現象も少なくなるため、みかけの電子の流れも低下し⁴⁾、インピーダンスが高くなる。ひび割れが内在すると、比誘電率が小さくなることでインピーダンスが高くなるため、先述の実験結果が裏付けられる。

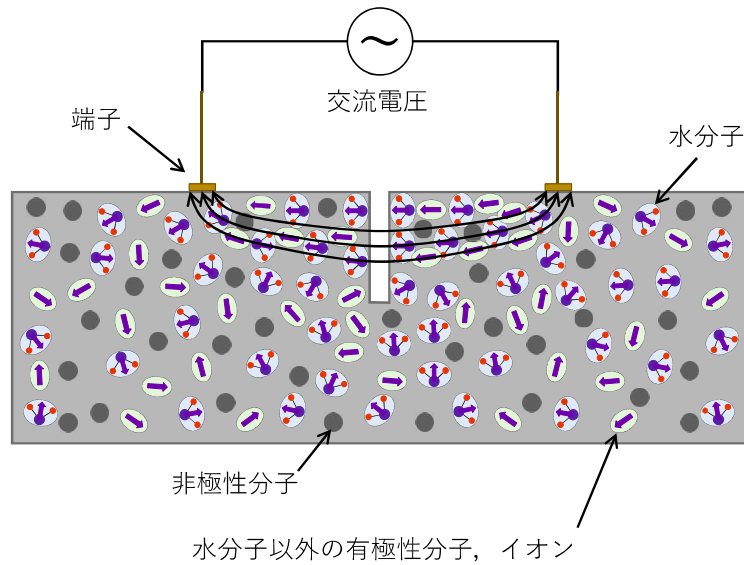


図 4-17 交流電圧負荷のコンクリート内部の模式図

(3) ドライシート素材とインピーダンス極大値との関係性

位置 B におけるインピーダンス極大値について、被覆するドライシート素材により TPC 試験体 < TPN 試験体 < TPA 試験体となった実験結果について考察する。

CFRP シートおよび AFRP シートで被覆されたコンクリート試験体が交流電圧を受けた時の状態の模式図を 図 4-18 に示す。

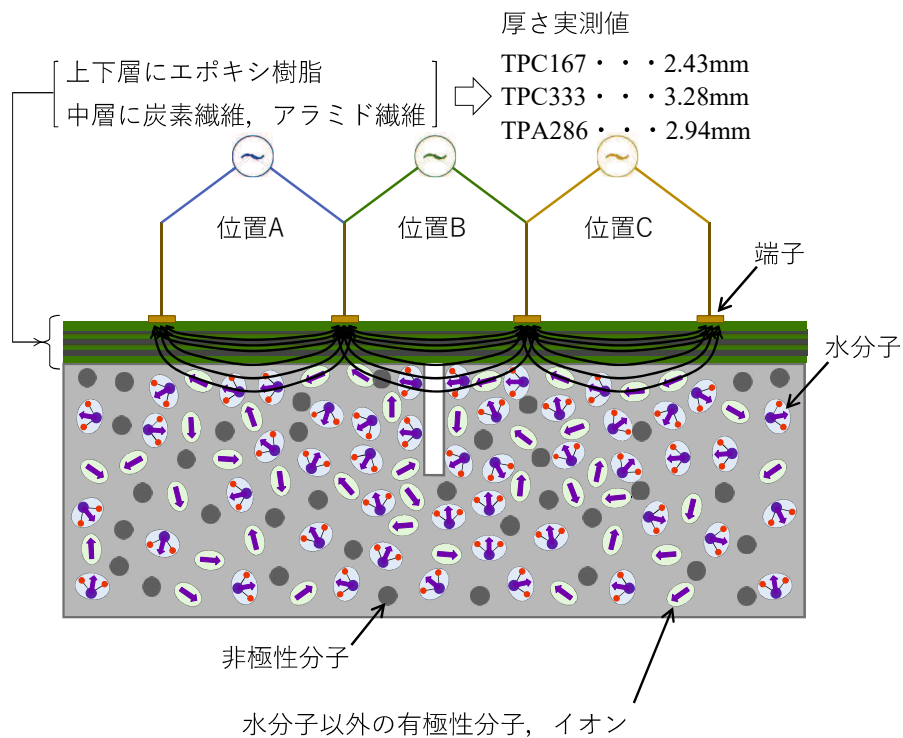


図 4-18 FRP シート被覆したコンクリートの交流負荷状態模式図

2つの端子間に形成される電場は、先にも述べたように両端子に近い範囲が強く、離れるほど弱く、表面側に偏った電場分布を呈する。その電場の影響を強く受ける FRP シート被覆がインピーダンスに大きく影響を与えるものと考えられる。

表 4-7 に示すように、FRP シート被覆を構成する素材の種類によって比誘電率が異なっている。インピーダンスの大きさは、誘電分極する物質の量とそのしやすさに反比例することから、比誘電率が小さい素材でできた FRP シート被覆ほどインピーダンスは大きいと考えられるので、TPN 試験体より TPA 試験体や TPC 試験体の方が大きくなる。被覆中に導体である CF を挟んでいる CFRP シート被覆の場合、抵抗が比較的小さい CF 中に電場による電子の流れが発生し、電流が流れることになる (図 4-19)。これは無限に誘電分極現象が起きているとみなすことができるため、CFRP シート被覆のみかけの比誘電率が大きくなるものと考えられる。このことから、TPC 試験体<TPN 試験体<TPA 試験体の順でインピーダンスが大きくなったものと推察される。

表 4-7 位置 B におけるインピーダンス極大値と比誘電率

| 試験体番号 | 位置 B でのインピーダンス極大値 | FRP シート構成素材の比誘電率※ |
|------------|-------------------|-------------------------------------|
| TPN000-050 | 2.40 [MΩ] | 6.0~10.0 |
| TPC167-050 | 1.61 [MΩ] | 炭素: - EP: 2.5~6.0 PA: 2.5~2.6 |
| TPC333-050 | 2.02 [MΩ] | |
| TPA286-050 | 2.67 [MΩ] | |

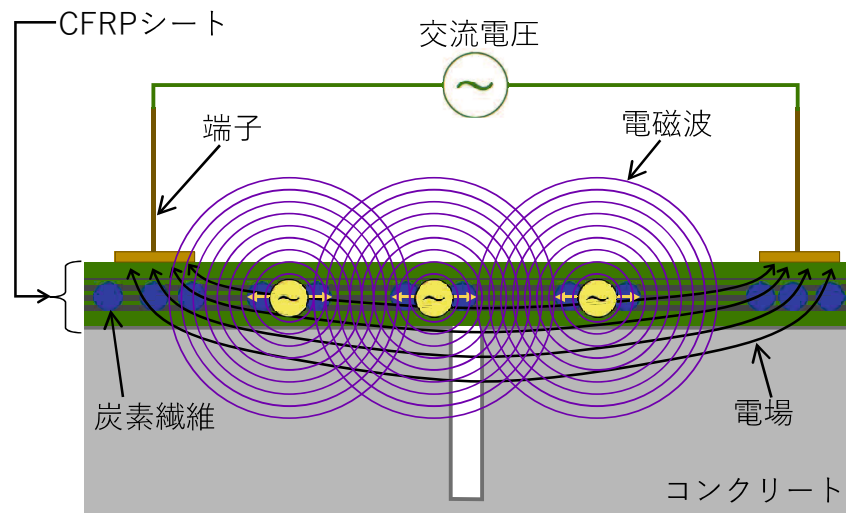


図 4-19 CFRP シート被覆からの電磁波発生模式図

電流・電圧の大きさと向きが時間的に変化する交流電場中の CFRP シート被覆の影響について考察する。このとき CF 中に流れる電流も交流電流となるため、CF は電磁波を発生する一種のアンテナのような役割を果たす。そのためプローブの 2 つの電極間に発生した電場により、CF 中に電流が発生し電磁波となる。

本実験ではプローブを繊維方向に対して直交する方向に配置したため、各々のCFが独立したものであれば、CF中にはほとんど電流は流れない。しかしながら、**図4-19**に示すように、部分的にCFは接触し束になっている箇所もある。その束になった箇所を通じて電流が流れ、電磁波が発生する。CF同士やその束同士にはエポキシ樹脂で満たされた部分もあり、隙間が形成される。先述のように形成された電場の影響範囲がその隙間を通じてコンクリートにまで及ぶ。そこでCFRPシートの繊維方向に対して平行に設けた人工ひび割れ（スリット）箇所において、ひび割れがない箇所に比べ、インピーダンスの極大値と位相角変位周波数が変化するため、コンクリートのひび割れを検出できたものと考えられる。

(4) 位相角の変位

位相角が3 MHz～4 MHz付近で負から正に変位することについて考察する。先述のようにコンクリートは一種の誘電体とみなすことができる。プローブの2つの端子間に発生した電場によって、コンクリート内の有極分子は電場方向に向きを揃え誘電分極状態となる。これは、電荷を蓄える一種のコンデンサとみなすこともできる。交流電圧を印加されたコンデンサは、その交流周波数が高くなるとインピーダンスが低くなる性質を有しており⁴⁾、同時に流れる交流電流は、印加される交流電圧に対して1/4周期前にずれる（位相角-90度）性質を有す⁴⁾。

本実験では**図4-8～図4-10**、**図4-14～図4-16**に示したように、3 MHz～4 MHz付近までは位相角が負であったことから、3MHz～4MHz付近までは、コンデンサとしての性質（容量性）を示したものと考えられる。位相角が正に変化した現象は、コンデンサとは異なり、印加交流電圧が交流電流よりも進んだことを表している。このような性質を持つ電気的素子として、インダクタが挙げられる。インダクタはコンデンサとは反対に、印加される交流電圧に対して、交流電流は1/4周期後ろにずれる（位相角+90度）性質を有す⁵⁾。これらのことから、コンクリートはFRPシート被覆の有無に関わらず、印加する交流電圧の周波数により、コンデンサ・インダクタの両性質を有し、それらが複雑に結びついた電気的回路とみなすことができる。その電気的特性を利用して、FRPシートで被覆され直接的に目視できないようなコンクリートのひび割れを検出できる技術の可能性が窺えた。

4.8 第4章のまとめ

本研究では、FRPシートで覆われたコンクリート部材表面近傍にあるひび割れを、コンクリート部材をひとつの誘電体と考えた時の電氣的インピーダンスや位相角の変化を捉えて検出する技術について、その基礎的実験により検証した。本論文では、FRPシートで覆われたコンクリート部材であっても、表面直下にある幅1mmのスリット（人工ひび割れ）を跨ぐように電極端子を配置し、電圧1V、周波数1MHz～8MHzの交流電圧を印加することで、ひび割れを検出できる技術を提案した。本研究で実施した基礎実験の範囲内において、以下のことが明らかになった。

- (1) ひび割れを跨いだインピーダンスの極大値は、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0.22MΩ～0.43MΩ（13.6%～19.3%）高い。
- (2) 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場合の位相変位周波数よりも0.14MHz～0.22MHz（3.9%～5.8%）低い。
- (3) FRPシートで覆われたコンクリート部材表面直下にある幅1mm、深さ30mm以上のひび割れは、周波数1MHz～8MHzの交流電圧を印加することで、インピーダンス極大値と位相変位周波数の周波数特性の変化により検出できる。
- (4) FRPシートで覆われたコンクリート部材表面直下にある幅1mmのひび割れについて、深さを求めることはできないものの、周波数1MHz～8MHzの交流電圧を印加することで、インピーダンス極大値と位相変位周波数の周波数特性の変化により検出できる。

今後の研究課題として、検出できるひび割れ深さを明らかにするため、2つの電極端子で形成される電場の深さ方向におよぼす影響範囲を調べるとともに、二方向炭素繊維ドライシートで被覆された場合の電場の影響範囲について明らかにする必要がある。実際のコンクリート構造物に生じるひび割れには、その内部に水分が存在する可能性もあるため、その影響についても今後検討する必要がある。またFRPシートで被覆されたコンクリート躯体の電氣的性質が本実験で確認されたが、広範な実験条件の基でデータ蓄積を図り、電氣的等価モデルを考案するとともに、得られた結果の数値シミュレーション等で検証する必要がある。さらに、測定される位相角が印可する交流電圧の周波数に応じて負から正へと変化するメカニズムを想定される電氣的等価モデルから明らかにする必要がある。

【参考文献】

- 1) 久部修弘, 吉武 勇, 稲森あゆみ, 浜田純夫: 純せん断実験に基づく炭素繊維シートのせん断補強の定量化, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.855-865, 2006.
- 2) 霜田光一: 導体を流れる交流の表皮効果, 物理教育, 第61巻, 第1号, pp.18-20, 2013.
- 3) 日本非破壊検査協会: 渦流探傷試験 II, pp.43-45, 1989.
- 4) Panasonic Industry: コンデンサの基礎知識, pp.1-6, 2019.
- 5) Panasonic Industry: インダクタ (コイル) の基礎知識, pp.4-6, 2019.

第5章

内部損傷の検出

5.1 実験目的

コンクリート構造物の劣化は、主として構造物の表面から発生・進行するものであるが、アルカリシリカ反応や凍害などコンクリート内部から劣化進行するものもある。このような場合でも、コンクリート表層を CFRP シートで被覆補強した構造物もみられる。このように構造物の表面・表層の劣化損傷だけではなく、より深部の劣化損傷を CFRP シートの上から検出できる技術が求められる。第4章を基に、CFRP シートで被覆したコンクリートの電氣的インピーダンスと位相角を調べることで、内部の劣化損傷を検出できる非破壊試験手法を考案することを目的に実験を行った。

5.2 使用材料と試験体作成

(1) 試験体

表 5-1 に示すように CFRP シートを 2 面および 4 面に貼付けた直方体コンクリート試験体（幅 400mm×奥行 100mm×高さ 100mm）を 15 体作製した（図 5-1）。試験体 15 体を 5 体ずつ 3 グループに分け、各グループの 3 体は長軸面 4 面に、残り 2 体は長軸面の対 2 面に CFRP シートを貼付けた。コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表 5-2 に示す。

表 5-1 試験体パラメータ

| 試験体記号 | シート貼付け面※ | 凍結融解サイクル | ドライシート | 目付量 |
|---------------|----------|----------|---------------------|----------------------|
| TP-F100-1,2,3 | 4 面 | 100 | 炭素繊維 厚さ=0.167 mm | 313 g/m ² |
| - 4,5 | 2 面 | | | |
| TP-F200-1,2,3 | 4 面 | 200 | | |
| - 4,5 | 2 面 | | | |
| TP-F300-1,2,3 | 4 面 | 300 | | |
| - 4,5 | 2 面 | | | |

| | |
|-------------------------|-------------------------------|
| ※ [4 面] | [2 面] |
| | |
| 試験体長軸方向面の 4 面にシートを貼る | 試験体長軸方向面の 対面となる 2 面にシートを貼る |

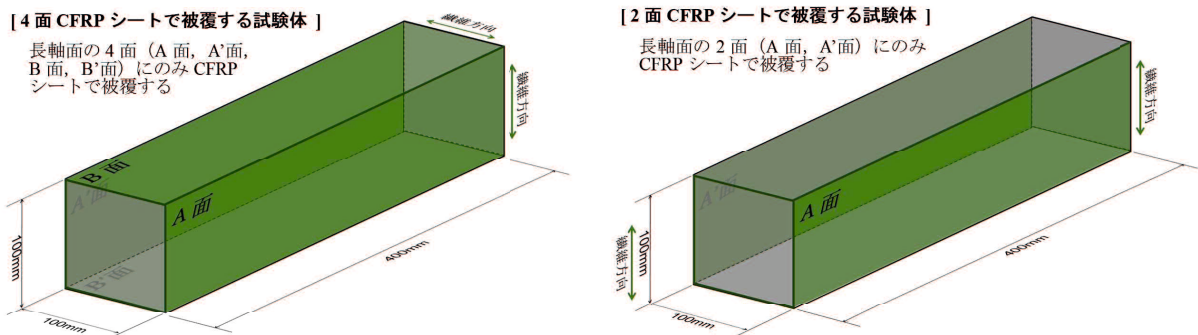


図 5-1 試験体の模式図

表 5-2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

| W/C % | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|--|--------------------------|---------|-------|-------|-------|
| | セメント※1 | 水 | 粗骨材※2 | 細骨材※3 | 混和剤※4 |
| 57.7 | 315 | 182 | 964 | 804 | 3.15 |
| スランブ | | 15.0 cm | | 空気量 | 5.2 % |
| ※1：普通ポルトランドセメント 密度=3.16 g/m ³ , Na ₂ O _{eq} =0.62% ※2：種類 I 砕石 2005 産地=茨城県つくば市 実績率=60.0%, 密度=2.67 g/cm ³ (表乾) 種類 II 砕石 2005 産地=茨城県石岡市 実績率=60.0%, 密度=2.67 g/cm ³ (表乾) ※3：種類 i 陸砂 産地=茨城県行方市 (石神) 粗粒率=2.60, 密度=2.58 g/cm ³ (表乾) 種類 ii 陸砂 産地=茨城県行方市 (麻生) 粗粒率=2.70, 密度=2.58 g/cm ³ (表乾) ※4：AE 減水剤 (標準形 I 種), Na ₂ O _{eq} =1.0% | | | | | |

コンクリート打設3日後に型枠脱型し、28日の20℃気中養生期間を経た後、炭素繊維（ドライ）シートを貼付けた。シート貼付け面の含水率をコンクリート中の水分により誘電率の変化を測定する含水率計で測定したところ、8%以下であった。また、試験体コンクリート打設と同時に作製した同寸法の試験体について、JIS A 1476に準じて測定した含水率は、質量基準質量含水率0.039 kg/kg、体積基準質量含水率0.090 kg/m³であった。含水率を確認した後、被覆する面を下地処理し、プライマー塗布、パテ処理を施した後、試験体長軸面に厚さ0.167 mmの炭素繊維（ドライ）シートをエポキシ樹脂接着剤（含侵樹脂）にて接着被覆した。CFRPシートの積層構成を図5-2に示す。なお、プライマーとパテおよび含侵樹脂は刷毛塗り、炭素繊維（ドライ）シートはローラーにて含侵樹脂を染み込ませた。ドライシートの繊維方向は図5-1に示すように、試験体長軸方向に直角方向とした。

5体ずつ3つのグループに分けた15体の試験体を用いて、JIS A 1148のA法に準じた凍結融解試験を行うことにより、CFRPシートで被覆したコンクリート内部の劣化・進行を模擬した。本論文では、3つのグループのうち凍結融解サイクル100回までとした試験体をTP-F100-1～5、同200回までとした試験体をTP-F200-1～5、同300回までとした試験体をTP-F300-1～5と表記する（表5-1）。ここで末尾の番号1～3は、CFRPシートで4面被覆したもの、同4・5は相対する2面をCFRPシートで被覆したものである。なお、凍結融解試験前の1週間は水

中養生を行った。JIS A 1148 で規定されている凍結融解試験中および試験後の質量測定、一次共鳴振動数の測定は実施していない。

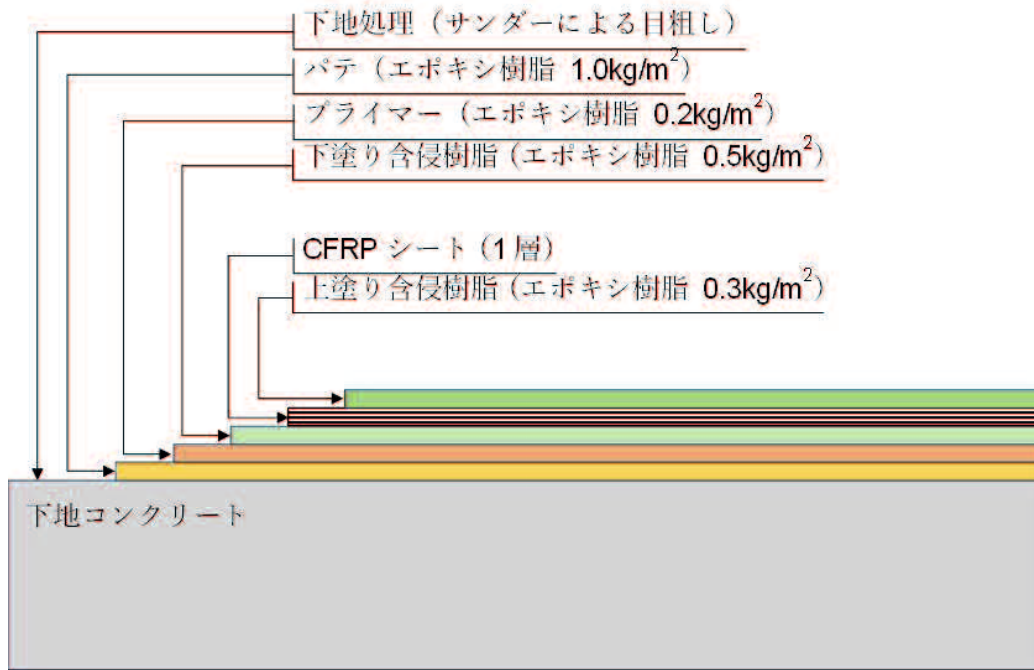
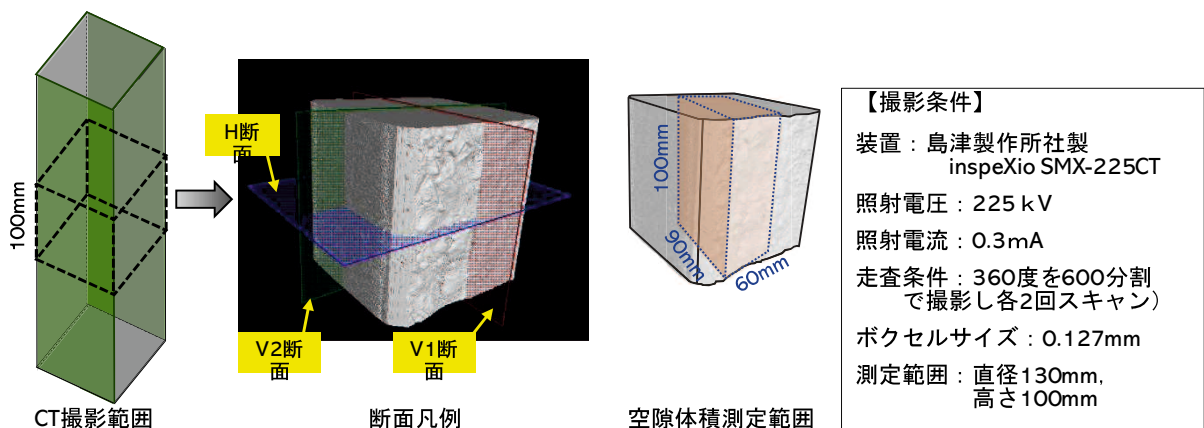


図 5-2 CFRP シートの積層構成

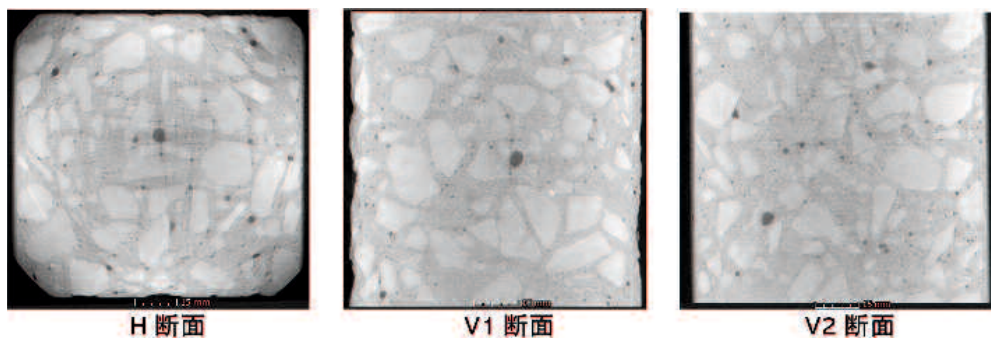
(2) X 線 CT 画像分析

凍結融解サイクル試験により、CFRP シートで被覆したコンクリート内部の劣化・進行状態を確認するため、X 線 CT 画像分析を実施した。CT 画像撮影範囲は、図 5-3 に示すように、試験体中央部 100mm 立方とした。撮影画像の代表例を図 5-4 に示す。

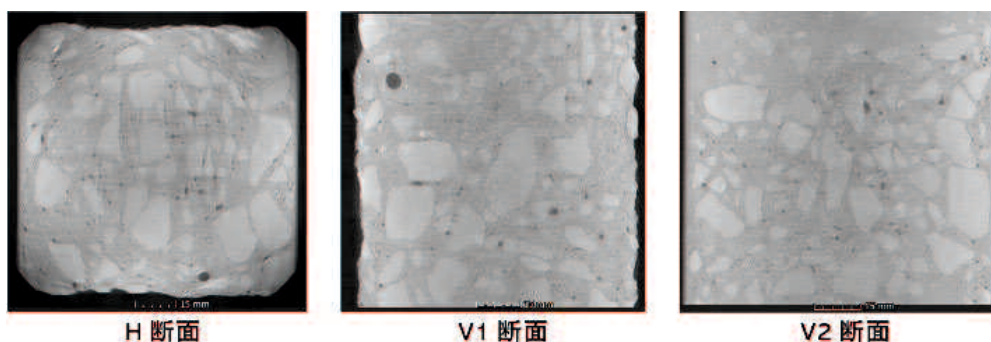


$$\text{空隙率\%} = \frac{\text{空隙合計体積mm}^3}{(100 \times 90 \times 60)\text{mm}^3} \times 100$$

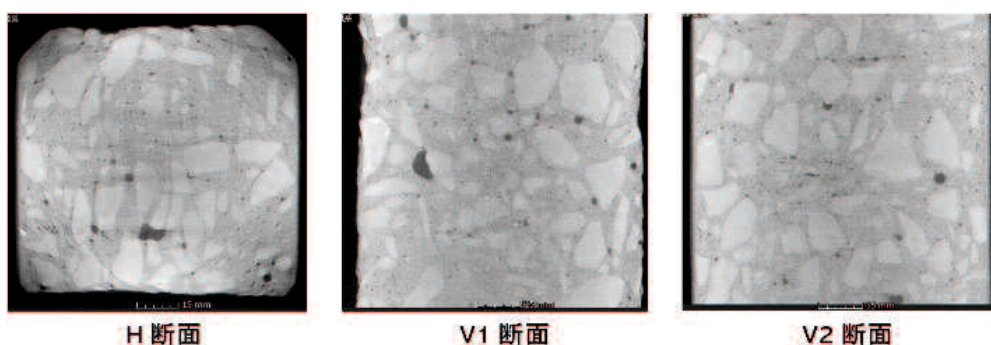
図 5-3 X 線 CT 画像凡例



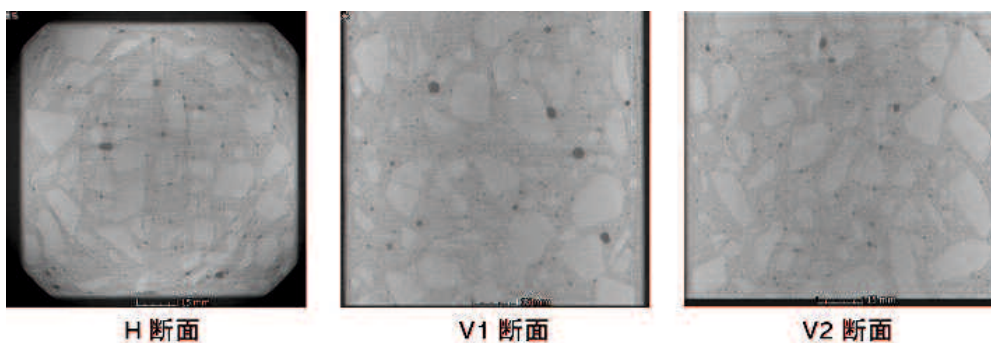
a) TP-F100-4 の X 線 CT 断層画像例



b) TP-F200-4 の X 線 CT 断層画像例



c) TP-F300-4 の X 線 CT 断層画像例



d) TP-F300-3 の X 線 CT 断層画像例

図 5-4 X 線 CT 断層画像例

また、CT画像撮影範囲内の幅60 mm×奥行90 mm×高さ100 mmの範囲を対象に、連続撮影したX線CT画像から、骨材やセメント水和生成物よりもX線の透過性が高く、撮影画像に黒く映る空隙の体積を集計した結果を**表5-3**に示す。なお、ここに示す空隙は、劣化進行に伴う気泡やひび割れが含まれている。

表5-3 試験体の空隙体積および空隙率

| | 2面被覆 | | | 4面被覆 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | TP-F100-4 | TP-F200-4 | TP-F300-4 | TP-F300-3 |
| 空隙合計体積 (mm ³) | 7850.30 | 8394.74 | 8441.15 | 7579.64 |
| 空隙率 | 1.45 % | 1.55 % | 1.56 % | 1.40 % |

5.3 実験方法

PC制御下のインピーダンス解析器を用いて、電極間に様々な周波数の電圧1V (2.82V_{p-p})の交流電圧を印加した。この状態におけるインピーダンスと位相角を測定した。ここでインピーダンスとは交流電圧を印加した時の電圧と電流の関係で定義されるパラメータで、振幅と位相の二つの要素を持ち合わせたベクトルであるが、以後は振幅をインピーダンスと表記する。また位相は印加した交流電圧に対する電流の時間的ズレ量を角度で表す。なお、同じ測定点での測定は周波数ごとに0.3秒の間隔をおいて5回連続して測定し、インピーダンス解析器内部にて平均化された数値(誤差はインピーダンス確度: ±0.05%rdg, 位相角確度: ±0.03度)を、その測定点における測定値として評価した。

図5-5に示す測定位置(CFRPシートを4面貼付けた試験体は位置A・B、2面貼付けた試験体は位置A)で図5-6に示す電極端子を有する測定端子をCFRPシート表面に直接押し当てることで、インピーダンスおよび位相角を測定した。位置AおよびBは試験体長軸面の中央位置で、それぞれの位置を中心に左右10mm離れた点を含む合計3点で測定した。また、印加する交流電圧の周波数帯は、1MHzから8MHzに設定し、凍結融解試験前の含水率の測定時に、インピーダンスと位相角を測定した。各サイクルの凍結融解作用を受けた試験体については、凍結融解試験前の含水率と同等となるまで気中養生した後にインピーダンスと位相角を測定した。なお、本測定系では様々な影響要因をできるだけ小さくするため、凍結融解試験前後の各試験体において、同じ位置(試験体長軸面中央)で測定した。凍結融解作用によりコンクリート内部には劣化損傷が発生するものとみなして実験を行った。

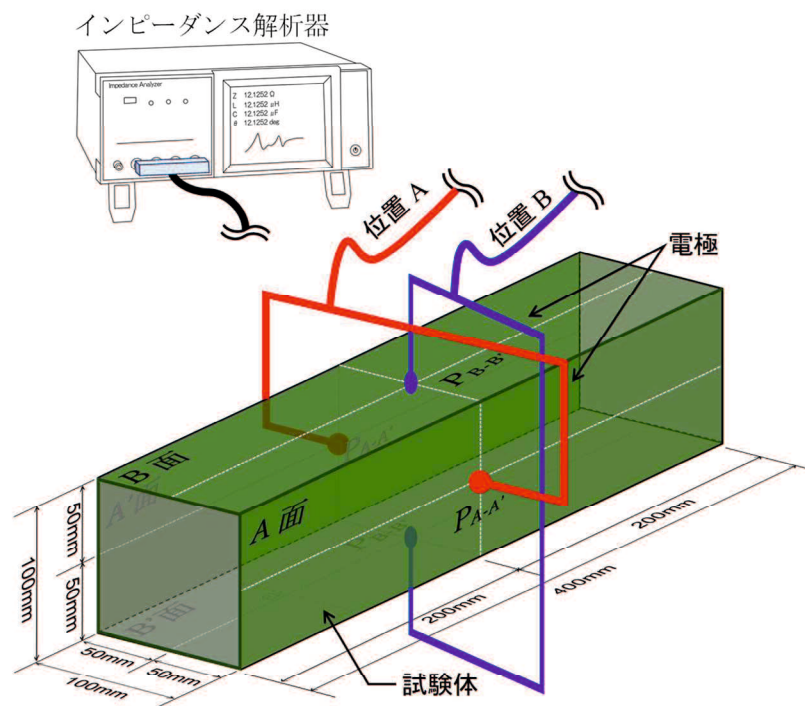


図5-5 インピーダンス測定位置

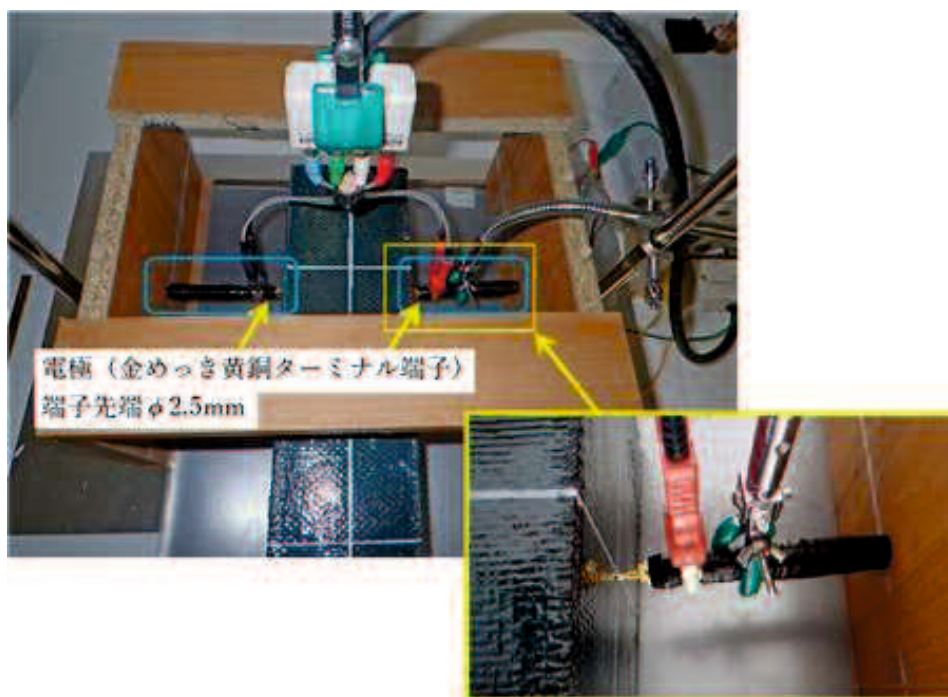


図 5-6 測定端子

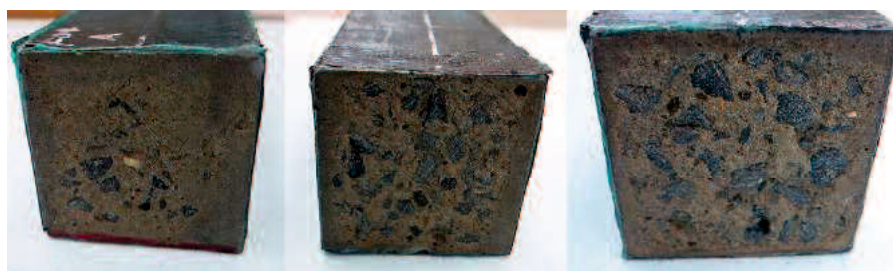
5.4 凍結融解サイクル数とインピーダンス極大値の変化

(1) 4面CFRPシート被覆試験体の測定結果

4面CFRPシートで被覆した9つの試験体（凍結融解サイクル100回用TP-F100-1,2,3；同200回用TP-F200-1,2,3；同300回用TP-F300-1,2,3）を対象に，凍結融解試験前後における周波数1MHzから8MHzの交流電圧を印加した際のインピーダンスの周波数特性を測定した．なお，後述する位相角も同時に測定した．各サイクル後の試験体の状態（側面）を**図5-7**に示す．



a) 100 サイクル凍結融解試験後の試験体（4面被覆）



b) 200 サイクル凍結融解試験後の試験体（4面被覆）



c) 300 サイクル凍結融解試験後の試験体（4面被覆）

図5-7 凍結融解試験後の試験体側面（4面被覆）

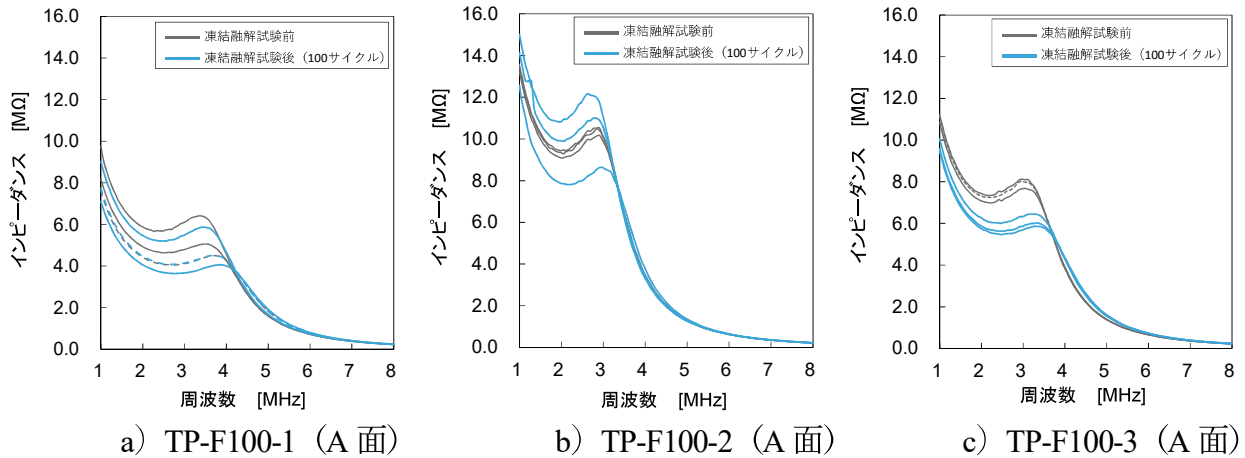


図 5-8 凍結融解 100 サイクル前後の 4 面 CFRP シート被覆試験体のインピーダンス周波数特性の例

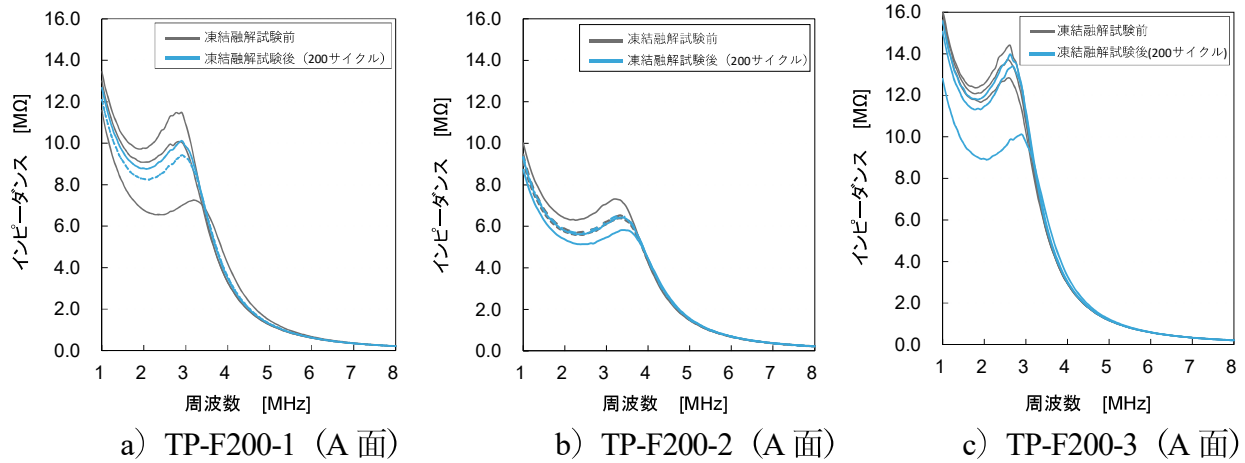


図 5-9 凍結融解 200 サイクル前後の 4 面 CFRP シート被覆試験体のインピーダンス周波数特性の例

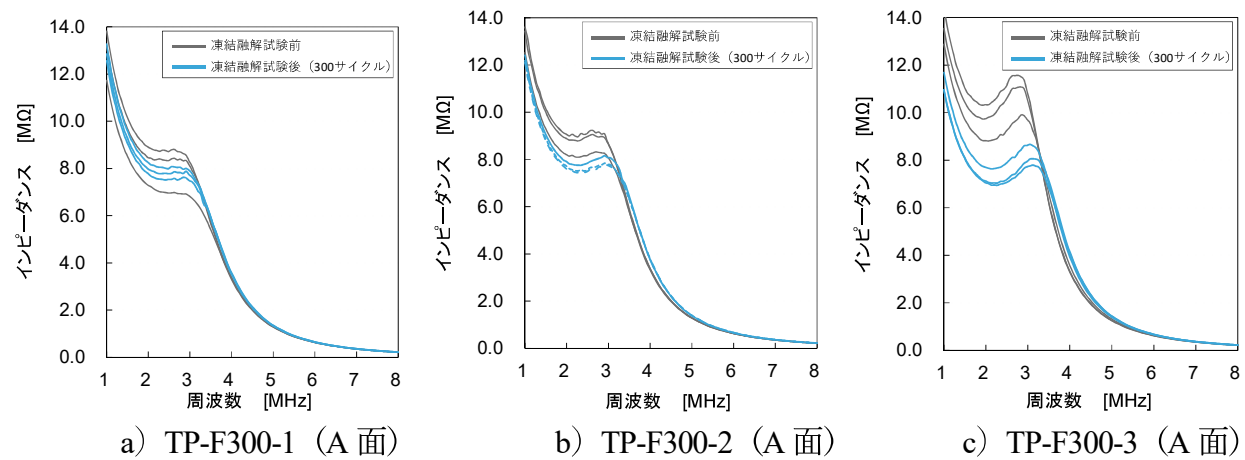


図 5-10 凍結融解 300 サイクル前後の 4 面 CFRP シート被覆試験体のインピーダンス周波数特性の例

凍結融解作用 100・200・300 サイクル前後の各インピーダンス周波数特性（測定位置 A）を **図 5-8～図 5-10** に示す。これらの結果に示すように、凍結融解作用の有無によらず、2MHz～4MHz 付近でインピーダンスの極大値を示した。各試験体において凍結融解試験前後に得られたインピーダンスの極大値（各試験体 3 点の平均値）を **表 5-4～表 5-6** に示す。

表 5-4 凍結融解 100 サイクル前後のインピーダンス極大値変化

| 試験体記号 | 測定面 | 凍結融解 試験前 | 凍結融解 試験後 | 差 分 |
|-----------|------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| TP-F100-1 | A-A' | 5.32 [MΩ] (3.50 [MHz]) | 4.81 [MΩ] (3.64 [MHz]) | -0.51 [MΩ] (+0.14 [MHz]) |
| | B-B' | 6.48 [MΩ] (3.69 [MHz]) | 6.63 [MΩ] (3.67 [MHz]) | +0.15 [MΩ] (-0.02 [MHz]) |
| TP-F100-2 | A-A' | 10.40 [MΩ] (2.89 [MHz]) | 10.61 [MΩ] (2.82 [MHz]) | +0.21 [MΩ] (-0.07 [MHz]) |
| | B-B' | 9.20 [MΩ] (2.89 [MHz]) | 8.52 [MΩ] (2.96 [MHz]) | -0.68 [MΩ] (+0.07 [MHz]) |
| TP-F100-3 | A-A' | 7.94 [MΩ] (2.98 [MHz]) | 6.11 [MΩ] (3.28 [MHz]) | -1.83 [MΩ] (+0.30 [MHz]) |
| | B-B' | 7.17 [MΩ] (3.21 [MHz]) | 6.35 [MΩ] (3.35 [MHz]) | -0.82 [MΩ] (+0.14 [MHz]) |
| 差分平均＝ | | | | -0.58 [MΩ] (+0.09 [MHz]) |

※表中上段数値はインピーダンス極大値を示し、下段数値はその時の周波数を示す

表 5-5 凍結融解 200 サイクル前後のインピーダンス極大値変化

| 試験体記号 | 測定面 | 凍結融解 試験前 | 凍結融解 試験後 | 差 分 |
|-----------|------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| TP-F200-1 | A-A' | 9.61 [MΩ] (2.98 [MHz]) | 9.66 [MΩ] (2.91 [MHz]) | +0.05 [MΩ] (-0.07 [MHz]) |
| | B-B' | 9.06 [MΩ] (3.24 [MHz]) | 7.84 [MΩ] (3.38 [MHz]) | -1.22 [MΩ] (+0.14 [MHz]) |
| TP-F200-2 | A-A' | 6.74 [MΩ] (3.31 [MHz]) | 6.25 [MΩ] (3.38 [MHz]) | -0.49 [MΩ] (+0.07 [MHz]) |
| | B-B' | 9.21 [MΩ] (3.03 [MHz]) | 8.40 [MΩ] (3.07 [MHz]) | -0.81 [MΩ] (+0.04 [MHz]) |
| TP-F200-3 | A-A' | 13.65 [MΩ] (2.58 [MHz]) | 12.49 [MΩ] (2.65 [MHz]) | -1.16 [MΩ] (+0.07 [MHz]) |
| | B-B' | 9.47 [MΩ] (3.07 [MHz]) | 8.03 [MΩ] (3.24 [MHz]) | -1.44 [MΩ] (+0.17 [MHz]) |
| 差分平均＝ | | | | -0.85 [MΩ] (+0.07 [MHz]) |

※表中上段数値はインピーダンス極大値を示し、下段数値はその時の周波数を示す

表 5-6 凍結融解 300 サイクル前後のインピーダンス極大値変化

| 試験体記号 | 測定面 | 凍結融解 試験前 | 凍結融解 試験後 | 差 分 |
|-----------|------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| TP-F300-1 | A-A' | 8.07 [MΩ] (2.63 [MHz]) | 7.86 [MΩ] (2.58 [MHz]) | -0.21 [MΩ] (-0.05 [MHz]) |
| | B-B' | 7.45 [MΩ] (3.12 [MHz]) | 6.86 [MΩ] (2.93 [MHz]) | -0.59 [MΩ] (-0.19 [MHz]) |
| TP-F300-2 | A-A' | 8.87 [MΩ] (2.65 [MHz]) | 7.92 [MΩ] (2.91 [MHz]) | -0.95 [MΩ] (+0.26 [MHz]) |
| | B-B' | 6.80 [MΩ] (3.45 [MHz]) | 6.40 [MΩ] (3.48 [MHz]) | -0.40 [MΩ] (+0.03 [MHz]) |
| TP-F300-3 | A-A' | 10.85 [MΩ] (2.82 [MHz]) | 8.17 [MΩ] (3.10 [MHz]) | -2.68 [MΩ] (+0.28 [MHz]) |
| | B-B' | 5.03 [MΩ] (3.85 [MHz]) | 5.12 [MΩ] (3.67 [MHz]) | -0.18 [MΩ] (-0.18 [MHz]) |
| 差分平均＝ | | | | -0.84 [MΩ] (+0.03 [MHz]) |

※表中上段数値はインピーダンス極大値を示し、下段数値はその時の周波数を示す

凍結融解 100 サイクル後のインピーダンス極大値については、凍結融解作用前の結果と比較すると、その差分は $-1.83 \text{ M}\Omega \sim +0.20 \text{ M}\Omega$ (平均: $-0.58 \text{ M}\Omega$) と増減する結果となり、一定の傾向はみられなかった。同じく、インピーダンス極大値を呈する時の周波数を凍結融解作用前の結果と比較すると、その差分は $-0.07 \text{ MHz} \sim +0.30 \text{ MHz}$ (平均: $+0.09 \text{ MHz}$) と増減し、一定の傾向はみられなかった。

これに対して 200 サイクル後では、 $-1.44 \text{ M}\Omega \sim +0.05 \text{ M}\Omega$ (平均: $-0.85 \text{ M}\Omega$)、 $-0.07 \text{ MHz} \sim +0.17 \text{ MHz}$ (平均: $+0.07 \text{ MHz}$) となり、一例を除いて、凍結融解前後でインピーダンス極大値は減少する傾向がみられ、インピーダンスが極大値を呈する時の周波数は高くなる傾向がみられた。さらに、凍結融解 300 サイクル後では、インピーダンス極大値が $-2.68 \text{ M}\Omega \sim -0.18 \text{ M}\Omega$ (平均: $-0.84 \text{ M}\Omega$) といずれも減少する結果となったが、インピーダンスが極大値を呈する時の周波数は $-0.19 \text{ MHz} \sim +0.28 \text{ MHz}$ (平均: $+0.03 \text{ MHz}$) と増減する結果となり、一定の傾向はみられなかった。

これらの結果から、4面を CFRP シートで被覆したコンクリートが、凍結融解作用を受けた場合、100 サイクルまでは一定の傾向はみられないものの、凍結融解サイクルに応じてインピーダンス極大値は小さくなり、差分(凍結融解前後の極大値の差異)も大きくなる傾向が窺えることはできたが、インピーダンスが極大値を呈する時の周波数は一定の傾向はみられなかった。

(2) 2面CFRPシート被覆試験体の測定結果

2面をCFRPシートで被覆した6試験体（凍結融解サイクル100回用TP-F100-4, 5；同200回用TP-F200-4, 5；同300回用TP-F300-4, 5）を対象に，凍結融解試験前後における周波数1 MHzから8 MHzの交流電圧を印加した際のインピーダンスの周波数特性を測定した．各凍結融解サイクル後におけるCFRPシートを貼付していないコンクリート長軸面を図5-11に示す．また，CFRPシートを4面貼付した試験と同様に，凍結融解試験前後に得られたインピーダンスの極大値（各試験体3点の平均値）を表5-7にまとめて示す．さらに，凍結融解作用100・200・300サイクル前後の各インピーダンス周波数特性（測定位置A）を図5-12に例示する．



a) 100 サイクル後



b) 200 サイクル後



c) 300 サイクル後

図5-11 各サイクル凍結融解試験後の試験体（2面被覆）

表 5-7 凍結融解作用を受けた2面 CFRP シート被覆試験体のインピーダンス極大値の変化

| 試験体記号 | 凍結融解 試験前 | 凍結融解 試験後 | 差分 |
|---------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| TP-F100-4 | 19.57 [MΩ] (2.15 [MHz]) | 16.47 [MΩ] (2.58 [MHz]) | -3.10 [MΩ] (+0.43 [MHz]) |
| | -5 | 19.27 [MΩ] (2.13 [MHz]) | 12.20 [MΩ] (2.96 [MHz]) |
| 100 サイクル差分平均＝ | | | -5.09 [MΩ] (+0.63 [MHz]) |
| TP-F200-4 | 23.84 [MΩ] (1.99 [MHz]) | 10.84 [MΩ] (3.26 [MHz]) | -13.00 [MΩ] (+1.27 [MHz]) |
| | -5 | 18.79 [MΩ] (2.15 [MHz]) | 8.08 [MΩ] (3.33 [MHz]) |
| 200 サイクル差分平均＝ | | | -11.90 [MΩ] (+1.23 [MHz]) |
| TP-F300-4 | 21.07 [MΩ] (2.06 [MHz]) | 10.72 [MΩ] (3.53 [MHz]) | -10.35 [MΩ] (+1.47 [MHz]) |
| | -5 | 23.46 [MΩ] (2.04 [MHz]) | 13.51 [MΩ] (3.31 [MHz]) |
| 300 サイクル差分平均＝ | | | -10.15 [MΩ] (+1.06 [MHz]) |

※表中上段数値はインピーダンス極大値を示し、下段数値はその時の周波数を示す

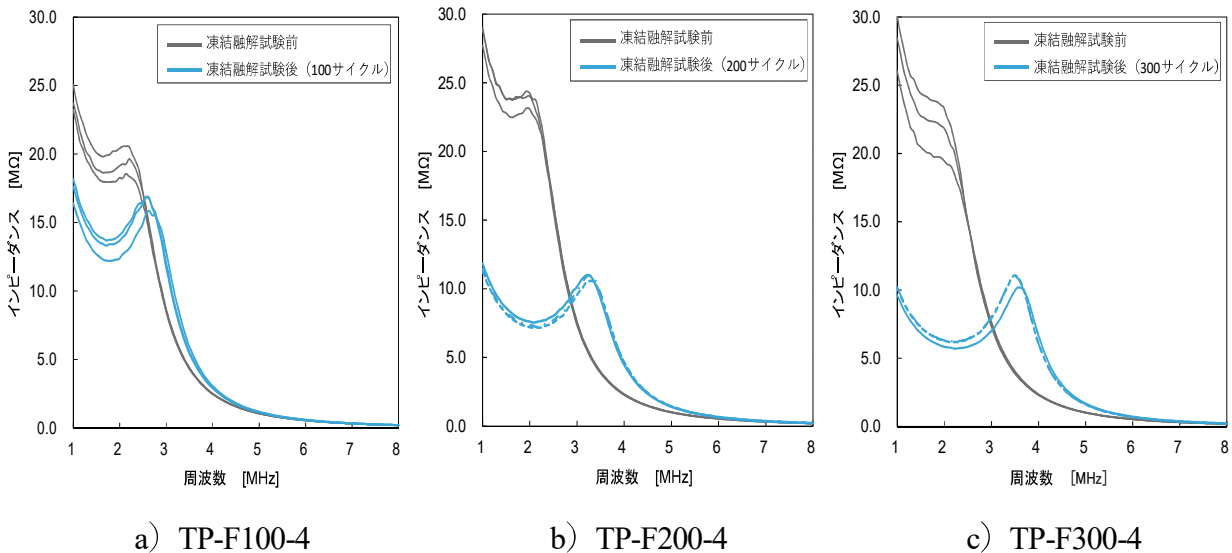


図 5-12 インピーダンス周波数特性 (2面被覆)

これら結果に示すように、4面 CFRP シートで被覆した場合と同様に周波数 2 MHz～4 MHz 付近でインピーダンスの極大値を示した。各試験体において凍結融解試験前後に得られたインピーダンスの極大値の変化を示す表 5-7 によると、凍結融解 100・200・300 サイクル後のイン

ピーダンス極大値はいずれも減少し、その差分平均は各々 $-5.09\text{ M}\Omega$ 、 $-11.90\text{ M}\Omega$ 、 $-10.15\text{ M}\Omega$ であった。

以上のことから、4面CFRPシートで被覆した試験体と同様に、凍結融解作用を受けることで、インピーダンス極大値は小さく、インピーダンスが極大値を呈する時の周波数は高くなった。なお、2面CFRPシートで被覆した試験体では、凍結融解サイクル数に応じて、インピーダンス極大値の顕著な減少が、インピーダンスが極大値を呈する時の周波数は顕著に高くなる傾向がみられるものの、凍結融解サイクル200回以上ではインピーダンス極大値の差分およびインピーダンスが極大値を呈する時の周波数の差分は有意な差異はみられなかった。なお、このインピーダンス極大値の変化は、凍結融解作用によりCFRPシートで被覆したコンクリートであっても、その内部から生じた劣化損傷を示唆するものと考えられる。

5.5 凍結融解サイクル数と位相変位周波数の変化

(1) 4面CFRPシート被覆試験体の測定結果

第4章と同様に位相角の周波数特性の変化に着目して検討を行った。4面CFRPシートで被覆した9つの試験体（凍結融解サイクル100回用TP-F100-1, 2, 3；同200回用TP-F200-1, 2, 3；同300回用TP-F300-1, 2, 3）について、凍結融解試験前後における、周波数1MHzから8MHzの交流電圧を印加した際の位相角の周波数を図5-13～図5-15に示す。

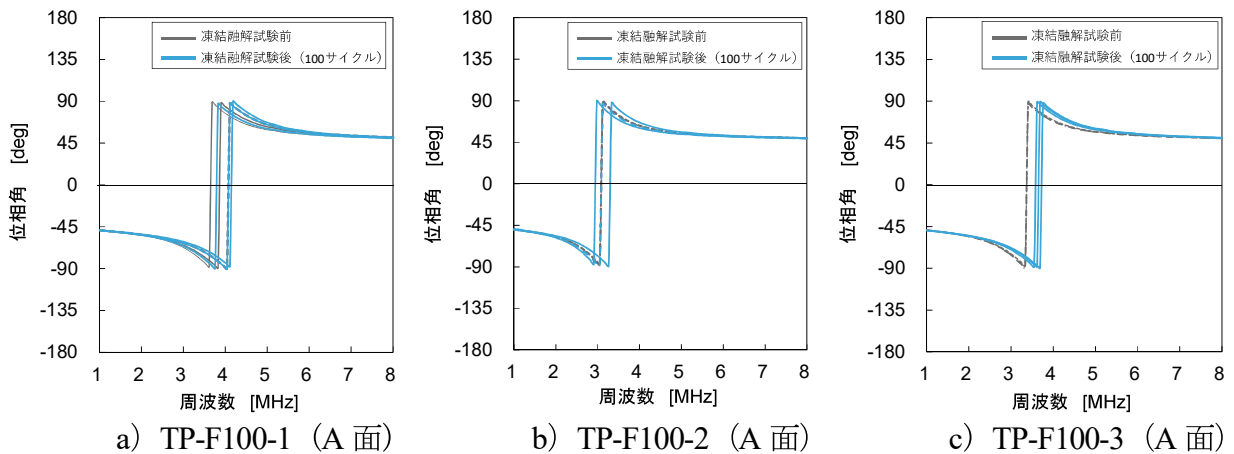


図5-13 凍結融解100サイクル前後の4面CFRPシート被覆試験体の位相角周波数特性の例

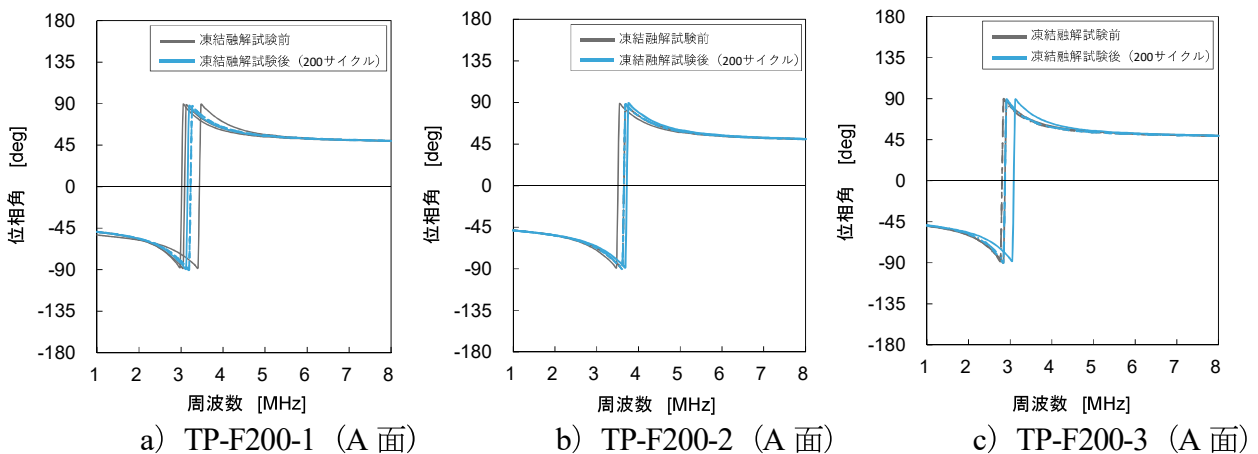


図5-14 凍結融解200サイクル前後の4面CFRPシート被覆試験体の位相角周波数特性の例

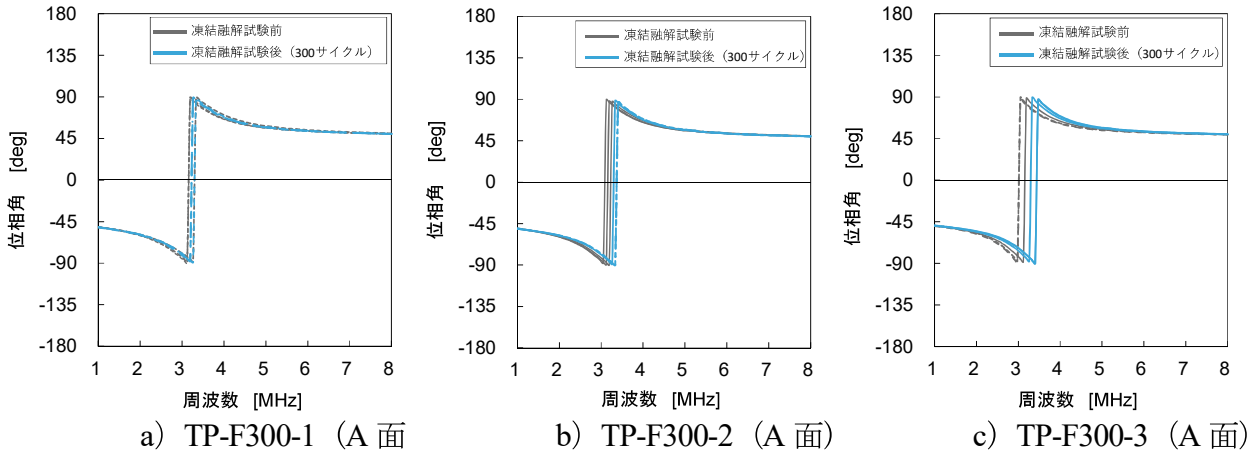


図 5-15 凍結融解 300 サイクル前後の 4 面 CFRP シート被覆試験体の位相角周波数特性の例

これらの結果に示すように、凍結融解試験前後によらず周波数 2 MHz～4 MHz 付近で位相角が負から正へと変化した。ここで各試験体において、凍結融解試験前後に得られた位相が負から正へと変化する時の周波数（位相変位周波数）を表 5-8～表 5-10 にまとめた。なお、ここに示す周波数は、各試験体 3 点の平均値である。

インピーダンス極大値で得られた結果と同様に、凍結融解 100 サイクル後の位相差の変化に着目すると、凍結融解作用前後の差分は 0 MHz～+0.28 MHz（平均：+0.12 MHz）と微増する結果となった。

次に凍結融解 200 サイクル後においては、位相変位周波数は+0.03 MHz～+0.16 MHz（平均：+0.10 MHz）となり、さらに 300 サイクル後では、位相変位周波数が+0.04 MHz～+0.32 MHz（平均：+0.13 MHz）といずれも増加した。

これらのことから、凍結融解作用を受けることで内部劣化損傷が進行するため、CFRP シートで 4 面被覆したコンクリートにおいても凍結融解サイクルに応じて位相変位周波数は大きくなることがわかった。

表 5-8 100 サイクル凍結融解試験の位相変位周波数変化

| 試験体記号 | 測定面 | 凍結融解試験前 | 凍結融解試験後 | 差分 |
|-----------|------|------------|------------|-------------|
| TP-F100-1 | A-A' | 3.86 [MHz] | 4.01 [MHz] | +0.15 [MHz] |
| | B-B' | 3.86 [MHz] | 3.86 [MHz] | 0 [MHz] |
| TP-F100-2 | A-A' | 3.09 [MHz] | 3.11 [MHz] | +0.02 [MHz] |
| | B-B' | 3.18 [MHz] | 3.28 [MHz] | +0.10 [MHz] |
| TP-F100-3 | A-A' | 3.37 [MHz] | 3.65 [MHz] | +0.28 [MHz] |
| | B-B' | 3.51 [MHz] | 3.65 [MHz] | +0.14 [MHz] |
| 差分平均 = | | | | +0.12 [MHz] |

表 5-9 200 サイクル凍結融解試験の位相変位周波数変化

| 試験体記号 | 測定面 | 凍結融解 試験前 | 凍結融解 試験後 | 差 分 |
|-----------|------|-------------|-------------|-------------|
| TP-F200-1 | A-A' | 3.18 [MHz] | 3.21 [MHz] | +0.03 [MHz] |
| | B-B' | 3.44 [MHz] | 3.58 [MHz] | +0.14 [MHz] |
| TP-F200-2 | A-A' | 3.60 [MHz] | 3.67 [MHz] | +0.07 [MHz] |
| | B-B' | 3.25 [MHz] | 3.32 [MHz] | +0.07 [MHz] |
| TP-F200-3 | A-A' | 2.82 [MHz] | 2.94 [MHz] | +0.12 [MHz] |
| | B-B' | 3.30 [MHz] | 3.46 [MHz] | +0.16 [MHz] |
| 差分平均 = | | | | +0.10 [MHz] |

表 5-10 300 サイクル凍結融解試験の位相変位周波数変化

| 試験体記号 | 測定面 | 凍結融解 試験前 | 凍結融解 試験後 | 差 分 |
|-----------|------|-------------|-------------|-------------|
| TP-F300-1 | A-A' | 3.21 [MHz] | 3.25 [MHz] | +0.04 [MHz] |
| | B-B' | 3.44 [MHz] | 3.51 [MHz] | +0.07 [MHz] |
| TP-F300-2 | A-A' | 3.16 [MHz] | 3.35 [MHz] | +0.19 [MHz] |
| | B-B' | 3.70 [MHz] | 3.81 [MHz] | +0.11 [MHz] |
| TP-F300-3 | A-A' | 3.07 [MHz] | 3.39 [MHz] | +0.32 [MHz] |
| | B-B' | 4.10 [MHz] | 4.15 [MHz] | +0.05 [MHz] |
| 差分平均 = | | | | +0.13 [MHz] |

(2) 2 面 CFRP シート被覆試験体の測定結果

同様に、コンクリート長軸の 2 面を CFRP シートで被覆した 6 試験体について、周波数 1 MHz から 8 MHz の交流電圧を印加した際の位相角の周波数特性を調べた。各凍結融解サイクル前後における位相角周波数特性を **図 5-16**～**図 5-18** に例示する。

これらの結果に示すように、4 面 CFRP シートで被覆した場合と同様に凍結融解試験前後によらず、2 MHz～4 MHz 付近で位相角が負から正へと変化した。ここで、凍結融解試験前後の位相変位周波数の平均値を **表 5-11** に示す。凍結融解 100・200・300 サイクルの位相変位周波数の差分平均は、それぞれ +0.49 MHz, +1.10 MHz, +1.23 MHz であった。このように、凍結融解作用を受けることで位相変位周波数は大きくなるなど、4 面 CFRP シート被覆したコンクリートで得られた傾向が、さらに顕著な結果として得られた。

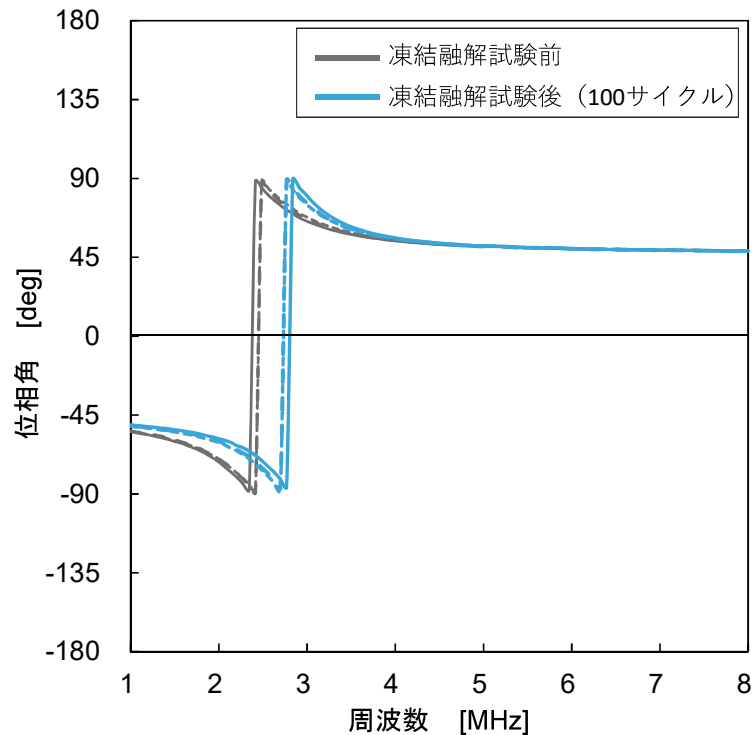


図 5-16 TP-F100-4 の位相角周波数特性 (2 面 CFRP シート被覆)

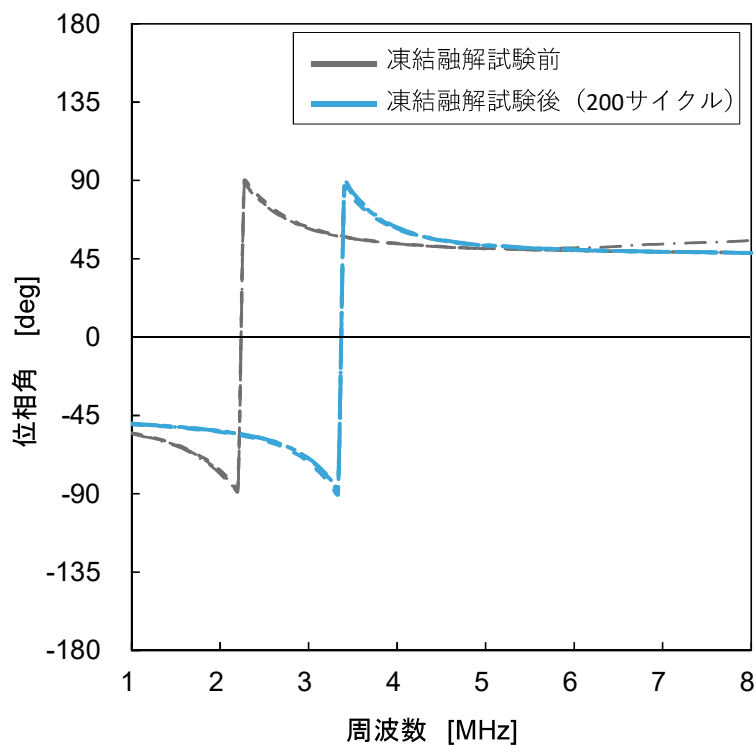


図 5-17 TP-F200-4 の位相角周波数特性 (2 面 CFRP シート被覆)

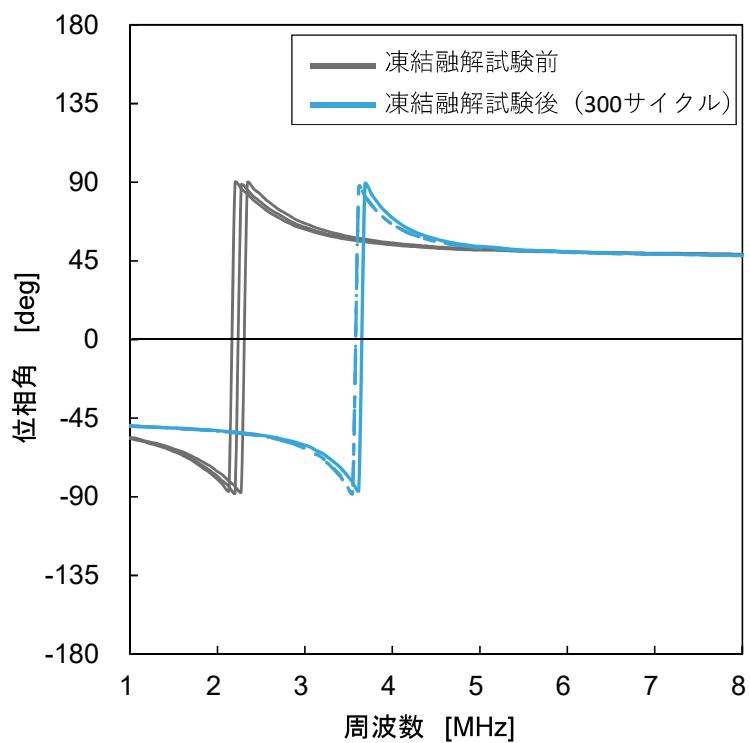


図 5-18 TP-F300-4 の位相角周波数特性 (2 面 CFRP シート被覆)

表 5-11 各サイクル凍結融解試験の位相変位周波数変化

| 試験体記号 | 凍結融解 試験前 | 凍結融解 試験後 | 差 分 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| TP-F100-4 | 2.43 [MHz] | 2.75 [MHz] | +0.32 [MHz] |
| -5 | 2.43 [MHz] | 3.09 [MHz] | +0.66 [MHz] |
| 100 サイクル差分平均= | | | +0.49 [MHz] |
| TP-F200-4 | 2.24 [MHz] | 3.37 [MHz] | +1.13 [MHz] |
| -5 | 2.45 [MHz] | 3.51 [MHz] | +1.06 [MHz] |
| 200 サイクル差分平均= | | | +1.10 [MHz] |
| TP-F300-4 | 2.24 [MHz] | 3.60 [MHz] | +1.36 [MHz] |
| -5 | 2.26 [MHz] | 3.35 [MHz] | +1.09 [MHz] |
| 300 サイクル差分平均= | | | +1.23 [MHz] |

5.6 実験結果に対する考察

実験結果から、周波数 1MHz～8MHz の交流電圧を印加した際の、インピーダンス極大値と位相角変位周波数の変化を捉えることで、目視では確認できない CFRP シート被覆されたコンクリート内部の劣化損傷の進行を検出できる可能性が窺えた。

凍結融解試験によりインピーダンス極大値は小さくなる結果が得られたが、これは図 5-7 と図 5-11 に示すように繰り返す凍結融解作用により、誘電体であるコンクリート表面（主に側面）がポップアウトしたため、試験体全体の静電容量が減ったことが一因と考えられる。特に2面被覆の試験体では、CFRP シートで被覆していない長軸面から表層部がはく離・はく落するため、その傾向が著しかったものと考えられる。また同時に表 5-3 に示すように、凍結融解作用によって内部ひび割れなどの微視的損傷が増加することにより、試験体全体の静電容量が減ったことも要因のひとつに挙げられる。前述のように、比誘電率が 6～10 程度のコンクリート中において、凍結融解作用によって内部損傷（比誘電率が 1 である空気層）が発生したことにより、試験体のみかけの比誘電率が低くなったことで静電容量が減ったものと考えられる。

本基礎実験を通じて、凍結融解サイクル数によるインピーダンス極大値および位相変位周波数の変化は、2面 CFRP シートで被覆した試験体の方がより顕著であった（図 5-19, 図 5-20）。

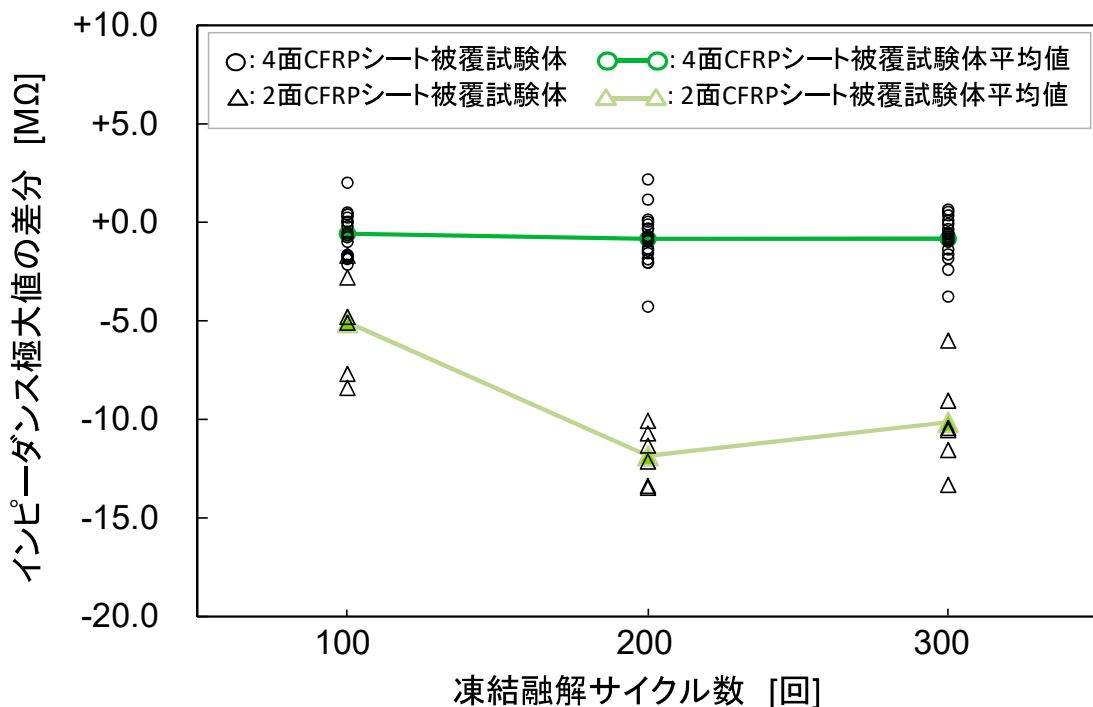


図 5-19 凍結融解サイクル数とインピーダンス極大値変化

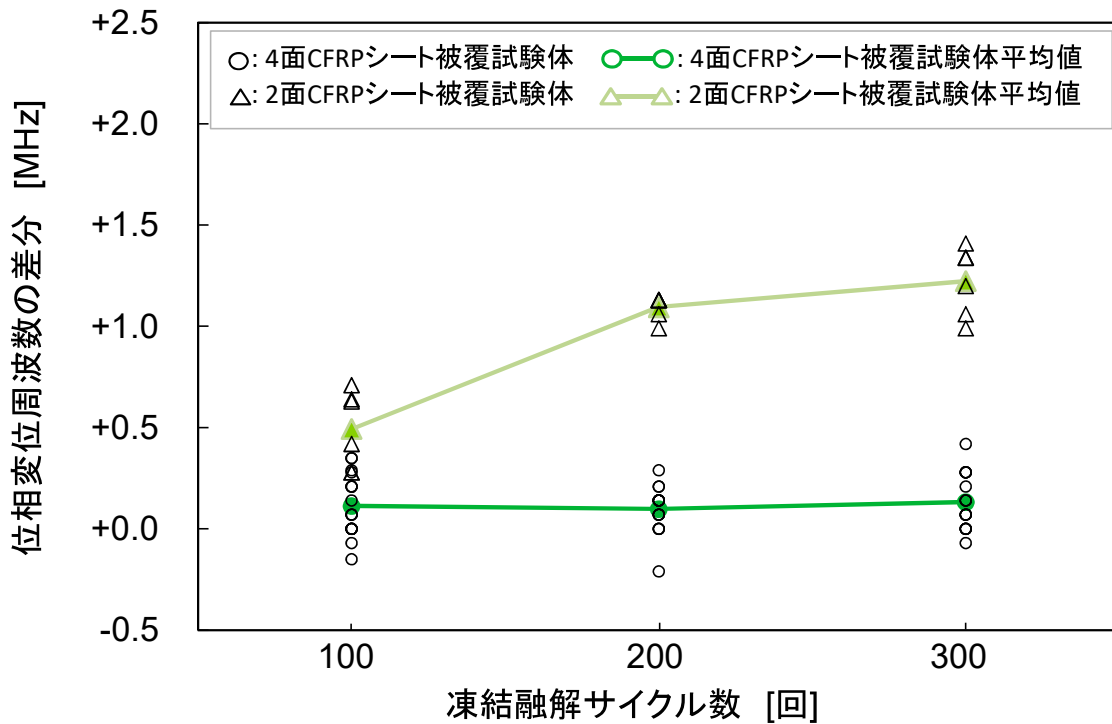


図 5-20 凍結融解サイクル数と位相変位周波数変化

本研究では、凍結融解サイクル数 (0・100・200・300) ごとに4面CFRPシート被覆した試験では計18測定値 (3試験体×2面×3測定点)、2面CFRPシート被覆した試験では計6の測定値 (2試験体×1面×3測定点) がえられた。凍結融解試験前後で得られたインピーダンス極大値や位相変位周波数は、4面および2面をCFRPシートで被覆した試験体より一定の傾向がみられた。ここで得られた結果について、凍結融解試験による明らかな影響と判断できるか否かについて検定した。検定結果を表5-12と表5-13に示す。なお、ここで用いた検定手法は、帰無仮説「凍結融解試験前の測定値と凍結融解試験後の測定値には違いがない」を、有意水準0.05 (帰無仮説が正しいか否かの判定確率) とした2標本t検定を実施した。

表 5-12 4面CFRPシート被覆試験体におけるt検定

| 凍結融解 サイクル | インピーダンス極大値 | | 位相変位周波数 | |
|--------------|-----------------------|-----|-----------------------|-----|
| | 凍結融解試験の 影響確率 | 判定※ | 凍結融解試験の 影響確率 | 判定※ |
| 100回 | 3.76×10^{-1} | なし | 3.13×10^{-1} | なし |
| 200回 | 2.65×10^{-1} | なし | 2.69×10^{-1} | なし |
| 300回 | 1.22×10^{-1} | なし | 2.70×10^{-1} | なし |

※ 影響あり：影響確率<0.05 影響なし：影響確率≥0.05

表 5-13 2面 CFRP シート被覆試験体における t 検定

| 凍結融解 サイクル | インピーダンス極大値 | | 位相変位周波数 | |
|--------------|-----------------------|-----|-----------------------|-----|
| | 凍結融解試験の 影響確率 | 判定※ | 凍結融解試験の 影響確率 | 判定※ |
| 100 回 | 3.07×10^{-3} | あり | 1.13×10^{-3} | あり |
| 200 回 | 4.14×10^{-6} | あり | 4.65×10^{-9} | あり |
| 300 回 | 2.09×10^{-5} | あり | 6.05×10^{-9} | あり |

※ 影響あり：影響確率 <0.05 影響なし：影響確率 ≥ 0.05

表 5-12 に示すように、4 面を CFRP シートで被覆した試験体の場合、平均値では若干のインピーダンス極大値の変化が、位相変位周波数の変化がみられたものの、統計的検定では、これらの変化は凍結融解試験によるものとは明確に判断できない結果となった。一方、表 5-13 に示すように、2 面を CFRP シートで被覆した試験体の場合、平均値でも明確なインピーダンス極大値の変化が、位相変位周波数の変化がみられたが、統計的に検定した場合でも、それらの変化は凍結融解作用に起因するものと判定できた。

本研究は、提案する内部劣化の検出方法の原理とその利用性について、基礎的実験を通じて調べたものである。本論文で示した結果は、試験体サイズレベルにおける内部損傷の検出結果であることに注意が必要である。実構造物で生じるような、より深度の内部損傷まで検出できるよう、本検出法についてさらに改良を加えていく必要があると考えている。

5.7 第5章のまとめ

本研究では、CFRP シートで覆われたコンクリート部材内部に生じる損傷を模擬するため、凍結融解試験により内部損傷を与えたコンクリートについて、CFRP シート上から損傷検出を試みた。特にコンクリート部材をひとつの誘電体と考えた時の電氣的インピーダンスや位相角の変化を捉えて検出する技術について、基礎的実験を基に検証した。本論文では、CFRP シートで覆われたコンクリート部材であっても、部材を挟むように電極端子を配置し、電圧 1 V 周波数 1 MHz ~ 8 MHz の交流電圧を印加することで、劣化損傷の進行を検出できる技術を提案した。本研究の範囲内において、得られた結論を以下にまとめて示す。

- (1) 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の極大値は $0.58 \text{ M}\Omega \sim 11.90 \text{ M}\Omega$ (7.5%~55.9%) 低下する傾向にある。
- (2) 凍結融解サイクルに応じて位相変位周波数は $0.1 \text{ MHz} \sim 1.23 \text{ MHz}$ (3.1%~54.7%) 大きくなり、その傾向はインピーダンス極大値の低下よりも顕著であった。
- (3) CFRP シートで被覆したコンクリートであっても、凍結融解作用によって内部損傷が生じるため、それに応じてみかけの比誘電率が低くなり静電容量が低下する。そのためインピーダンス極大値および位相変位周波数に変化が生じるものと考えられた。
- (4) (1)~(3)を踏まえ、周波数 1 MHz~8 MHz の交流電圧を印加してインピーダンス極大値と位相角変位周波数の変化を捉えることで、CFRP シート被覆されたコンクリート内部の劣化損傷の進行を検出できる可能性が窺えた。
- (5) 4面を CFRP シートで被覆したコンクリートでは、凍結融解による内部損傷の進行を検出することが困難である。

今後の研究課題として、検出できるひび割れ深さを明らかにするため、2つの電極端子で形成される電場の深さ方向におよぼす影響範囲を調べるとともに、二方向炭素繊維ドライシートで被覆された場合の電場の影響範囲について明らかにする必要がある。実際のコンクリート構造物に生じるひび割れには、その内部に水分が存在する可能性もあるため、その影響についても今後検討する必要がある。また FRP シートで被覆されたコンクリート躯体の電氣的性質が本実験で確認されたが、広範な実験条件の基でデータ蓄積を図り、電氣的等価モデルを考案するとともに、得られた結果の数値シミュレーション等で検証する必要がある。

第6章

等価回路モデルによる検証

6.1 目的

ひび割れ等の損傷箇所が表面近傍または内部にあるのか、回路モデルのパラメータから推定できる可能性があるものと考え、コンクリート表面がCFRPシートで覆われた試験体の等価回路を考案し、インピーダンスおよび位相角の周波数特性を再現性について検討した。

6.2 表面ひび割れおよび内部損傷測定系の等価回路

空気層とみなせるひび割れが発生することでみかけの比誘電率 ϵ_r が低下し、静電容量 C が小さくなる。静電容量 C が小さくなるということは、インピーダンスが大きくなる。表面直下のひび割れに対する測定結果はそのようになったことから、表面直下のひび割れを含む表層部分の静電容量 C_s と CFRP シートとの界面に生じる接触抵抗 R_s とは直列接続となっているものと考えられる。一方、ひび割れが内部にある試験体では逆にインピーダンスが小さくなっている。このことから、コンクリート内部に生じているひび割れなどの損傷や水分、その他物質による静電容量 C_I と抵抗 R_I との並列接続が考えられる。さらに、位相角が周波数の増加に伴い、負から正に変化することから、インダクタとの並列および直列接続も考えられる。インダクタは電流を一定に保つ役目をするデバイスであり、一般的にはコイルであるが、表面を被覆している炭素繊維がそれに類似した役割を果たしていると考えられる (図 6-1, 図 6-2)。以上のことを鑑みて、本実験系の等価回路を図 6-3 のように推定した。

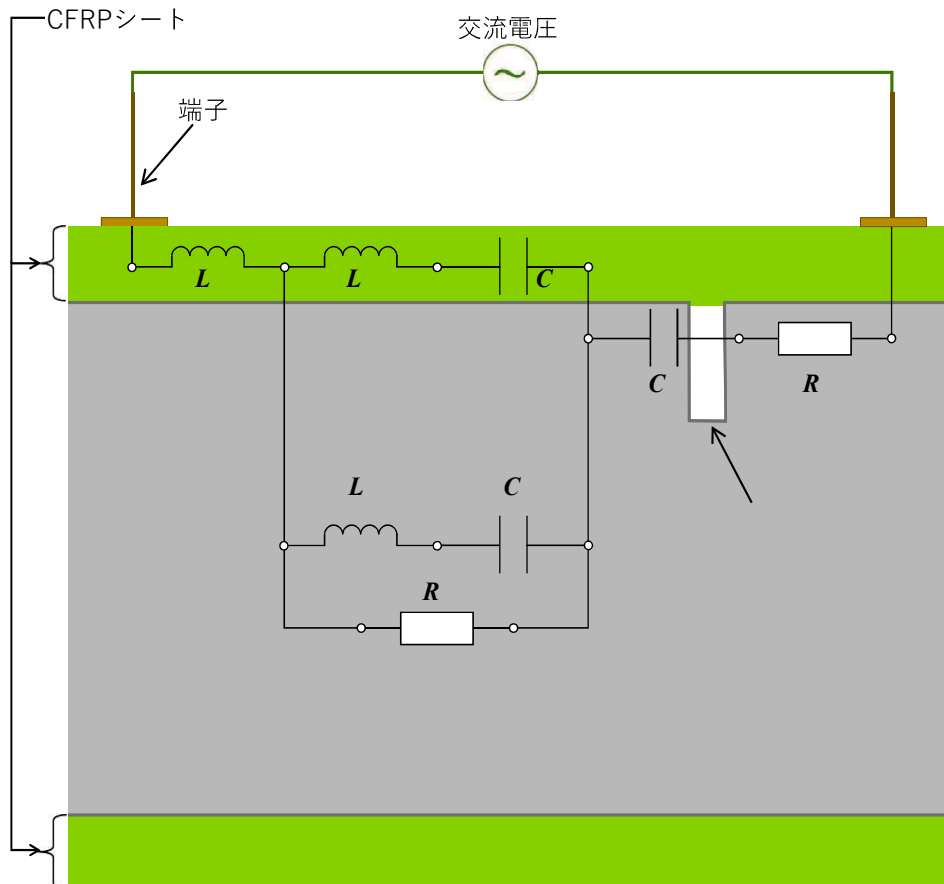


図 6-1 表面ひび割れ測定時の等価回路の概念図

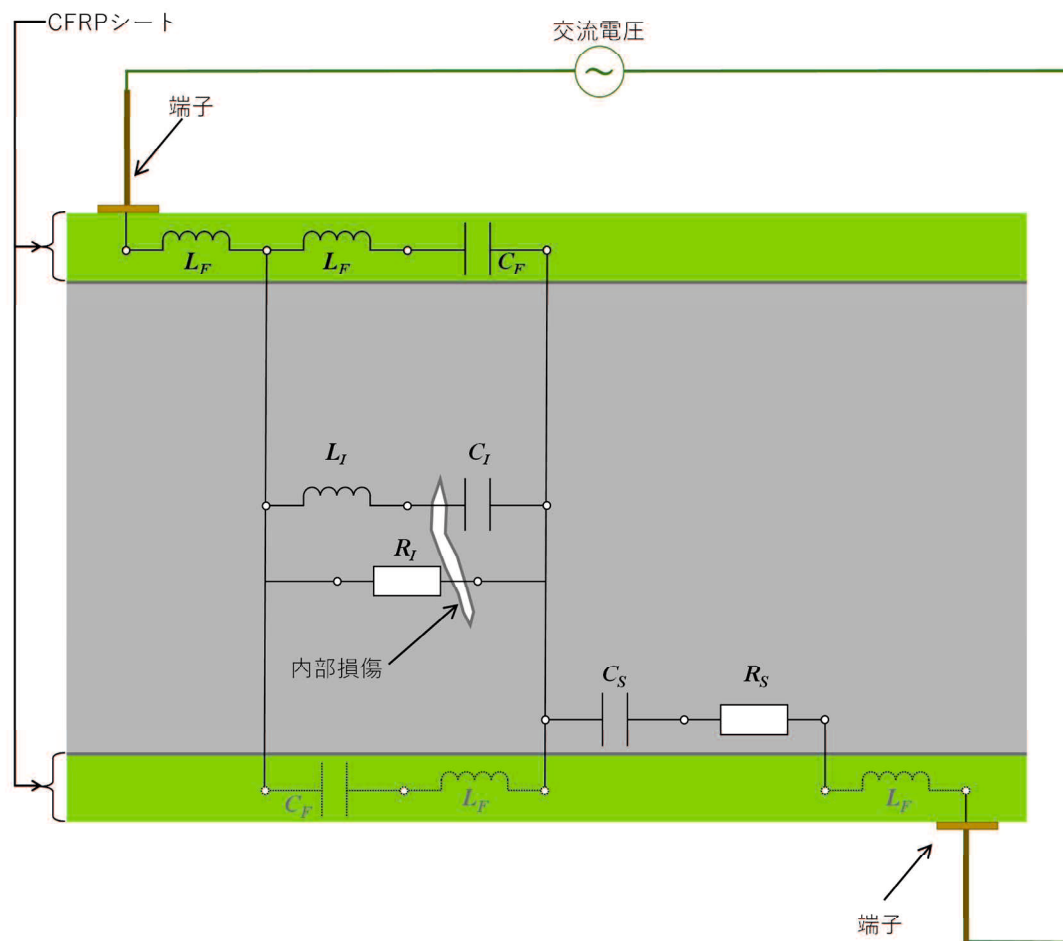
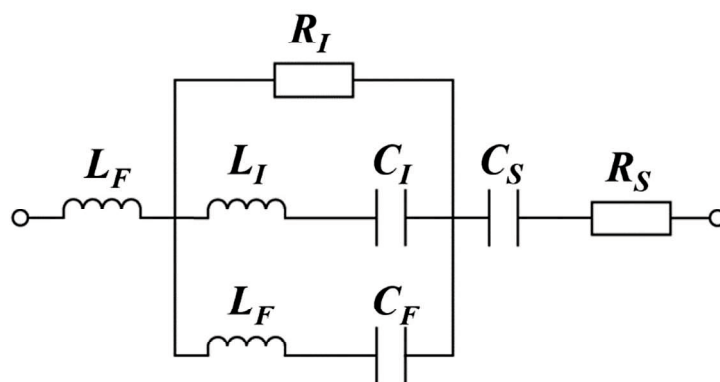


図 6-2 内部損傷測定時の等価回路の概念図



- C_S : 表層部分のコンデンサ成分
- L_F : CFRP層のインダクタ成分
- L_I : 内部のインダクタ成分
- C_I : 内部のコンデンサ成分
- R_S : 表層部分の抵抗成分
- C_F : CFRP層のコンデンサ成分
- R_I : 内部の抵抗成分

図 6-3 想定される等価回路

6.3 等価回路のインピーダンス

図 6-3 に示す等価回路のインピーダンス \mathbf{Z} (複素インピーダンス) は以下の式(1)のようになる。ただし、ここで γ_I , γ_F , β は以下の式(2), (3), (4) で表される。

$$\mathbf{Z} = \left[R_S + \frac{R_I \gamma_I^2 \gamma_F^2}{\gamma_I^2 \gamma_F^2 + \beta^2} \right] \quad (1)$$

$$-j \left[\frac{1}{\omega C_S} + \frac{\beta}{\gamma_I^2 \gamma_F^2 + \beta^2} - \omega L_F \right]$$

$$\gamma_I = 1 - \omega^2 C_I L_I \quad (2)$$

$$\gamma_F = 1 - \omega^2 C_F L_F \quad (3)$$

$$\beta = \omega R_I (C_F \gamma_I + C_I \gamma_F) \quad (4)$$

なお、 j は虚数を表す記号、 ω は角周波数であり、周波数を f とすると $2\pi f$ で表される数値である。測定されるインピーダンス \mathbf{Z} は、式(1)で表される複素インピーダンスの絶対値であり、

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{\text{Im}[\mathbf{Z}]^2 + \text{Re}[\mathbf{Z}]^2} \quad (5)$$

から求められる。また、位相角 θ は、

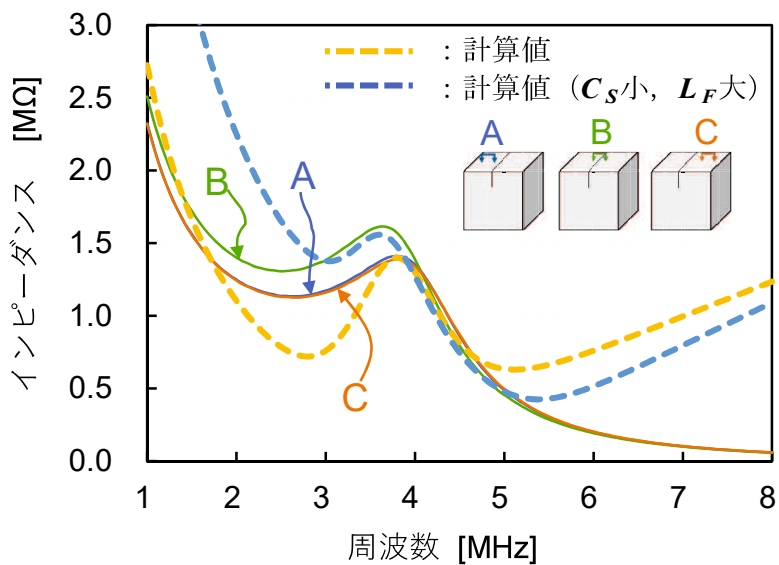
$$\theta = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[\mathbf{Z}]}{\text{Re}[\mathbf{Z}]} \quad (6)$$

より求めることができる。

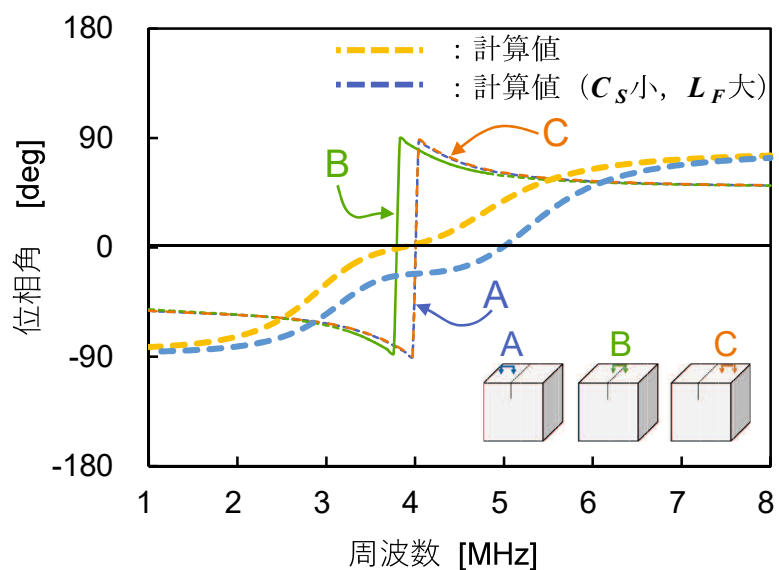
6.4 等価回路と実測値の比較

(1) C_S と L_F による Z の変化

等価回路において、鳳-テブナンの定理^りを複数回用いて解析し導出した数値である $C_S=0.055$ pF, $R_S=0.3$ M Ω , $L_F=31$ mH, $C_F=0.3$ pF, $L_I=10$ mH, $R_I=1.1$ M Ω , $C_I=0.05$ pF と設定し, C_S と L_F を変化させ, 実測値と比較した結果を図6-4に示す. なお, ここでは C_S とあわせて L_F を34 mHとした結果を示す. 表面ひび割れが存在すると C_S が小さくなるので, C_S を0.03 pFと小さくするとインピーダンスは高くなる傾向については実測データと同様であったが, 位相変位周波数については実測値と整合しなかった.



(a) インピーダンス Z

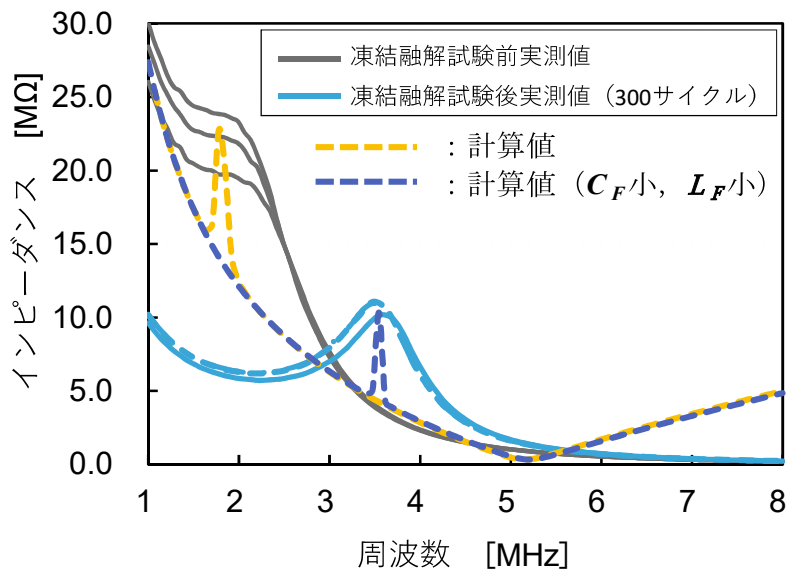


(b) 位相角 θ

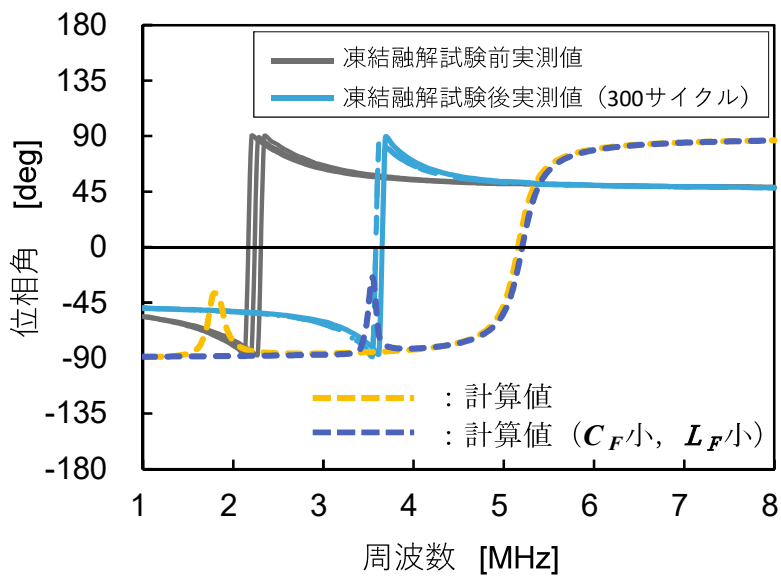
図6-4 等価回路の C_S と L_F による Z と θ の変化

(2) C_I と L_F による Z の変化

等価回路において、鳳一テブナンの定理¹⁾を複数回用いて解析し導出した数値である $C_S=0.0056\text{ pF}$ 、 $R_S=0.3\text{ M}\Omega$ 、 $L_F=170\text{ mH}$ 、 $C_F=0.05\text{ pF}$ 、 $L_I=1.2\text{ mH}$ 、 $R_I=20\text{ M}\Omega$ 、 $C_I=0.5\text{ pF}$ と設定し、 C_I と L_F を変化させ実測値と比較した結果を図6-5に示す。なお、ここでは C_I とあわせて L_F を 167 mH に変化させたものである。内部損傷が存在すると C_I が小さくなるので、 C_I を 0.016 pF と小さくするとインピーダンスは低くなる傾向については実測データと一致したが、位相変位周波数の特性については実測値と形状が異なるものであった。



(a) インピーダンス Z



(b) 位相角 θ

図6-5 等価回路の C_I と L_F による Z と θ の変化

6.5 第 6 章のまとめ

本研究では、表面近傍と内部に損傷部を設けた CFRP シートで被覆されたコンクリート部材を、ひとつの誘電体と考えた時の電氣的インピーダンスや位相角の変化を捉えて検出する技術について、等価回路を想定し実測値と比較し検証した。以下に本研究の主な要点をまとめて示す。

- (1) 表面直下および内部にひび割れが生じた CFRP シートで覆われたコンクリートの等価回路を推定し、測定値と等価回路から計算される結果は、インピーダンス極大値および変曲点の傾向を再現できた。
- (2) CFRP シートで覆われたコンクリートの表面直下および内部に損傷が生じた場合、コンクリートのみかけの比誘電率が低くなり静電容量が低下するため、インピーダンス極大値および位相変位周波数が生じる。

今後の研究課題として、以下の課題があげられる。

- I. CFRP シートで被覆されたコンクリートの電氣的性質が確認され、電氣的等価回路を考案したところ、インピーダンス極大値では実測値との一致はみられたものの、周波数特性形状が十分にフィッティングできておらず、位相変位周波数では特性が異なった。さらに広範な実験条件の基でデータ蓄積を図り、等価回路モデルの妥当性検証を行う必要がある。
- II. 表面ひび割れ測定系と内部損傷測定系を同時に電氣的にモデル化した等価回路であるため、周波数特性形状がフィッティングできなかった可能性もある。表面ひび割れ測定系と内部損傷測定系それぞれにおいて、非線形回帰分析も適用してより詳細な等価回路を考案し、検証していく必要がある。

【参考文献】

- 1) 黒木修隆：電気回路 I，オーム社，pp.129-143，2012.

第 7 章

結論

7.1 本研究のまとめ

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、有効に物理的信号を内部に伝達させることも、内部からの信号に対する反応情報も得ることができず、内部劣化の度合い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なされているが、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されてこなかった。

そこで本研究では、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、その電気的インピーダンスの周波数特性について実験的に明らかにし、この特性を用いて内部劣化を検出する非破壊試験手法を提案した。

本論文は、これらの実験的研究をまとめたものである。その主な要旨と結論を以下に示す。

「第3章 検出原理と適用条件の設定」では、表面に人工ひび割れを設けた、一辺 200 mm の立方体のコンクリート試験体に 1 kHz から 8 MHz までの交流電圧を負荷させ、2 電極端子を有するプローブを人工ひび割れの真上位置、左位置と右位置におけるインピーダンスと位相角を測定した。この基礎実験から、ひび割れの有無にかかわらず、印加する電圧の周波数が高くなるにつれて一様にインピーダンスは減少し、3 MHz~4 MHz 付近で極大値を示すとともに、位相角も負の値から正の値へと変化することを明らかにした。また、測定に使用する交流電圧の周波数帯域を 1 MHz~8 MHz と設定することにより、インピーダンスおよび位相角の周波数特性の変化を捉えることができることを明らかにした。

「第4章 表面ひび割れの検出」では、電気的インピーダンスおよび位相角の変化を基に、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て、表面直下に人工ひび割れを設けた、一辺 200 mm 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に 1 MHz から 8 MHz 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 3 MHz~4 MHz 付近でインピーダンスが極大値をとること同時に、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 0.22 M Ω ~0.43 M Ω (13.6%~19.3%) 高いことがわかった。さらに、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 0.14 MHz~0.22 MHz (3.9%~5.8%) 低くなることを明らかにした。周波数 1 MHz~8 MHz の交流電圧を印加してインピーダンス極

大値と位相角変位周波数の変化を捉えることで、CFRP シート被覆されたコンクリート表面の深さ 30 mm 以上のひび割れを検出できる可能性があることを明らかにした。

「第5章 内部損傷の検出」では、電気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、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用い、1 MHz から 8 MHz 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 0.58 M Ω ～11.90 M Ω (7.5%～55.9%) 低下することと、位相変位周波数が 0.1 MHz～1.23 MHz (3.1%～54.7%) 大きくなることが明らかになった。周波数 1 MHz～8 MHz の交流電圧を印加してインピーダンス極大値と位相角変位周波数の変化を捉えることで、CFRP シート被覆されたコンクリート内部の劣化損傷の進行を検出できる可能性があることを明らかにした。

「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計算される傾向は一致することを明らかにした。

7.2 今後の課題の研究展望

本研究を通じて、FRPシートで覆われたコンクリート試験体に対して、周波数1MHz～8MHzの交流電圧を印加することで、電氣的インピーダンスや位相角の周波数特性の変化を捉えることにより表面近傍にあるひび割れや内部の損傷およびその進行を検出できる可能性を窺うことができた。

この研究では、検出できるひび割れ深さが明らかにできていなかったため、2つの電極端子で形成される電場の深さ方向におよぼす影響範囲を調べるとともに、二方向炭素繊維ドライシートで被覆された場合の電場の影響範囲について明らかにする必要がある。また、実際のコンクリート構造物に生じるひび割れには、その内部に水分が存在する可能性もあるため、その影響についても今後検討する必要がある。

また、試験体の切断試験により実際に生じている劣化損傷の程度を調べ、本研究で提案した手法による検出結果との相関性について定量評価する必要がある。さらに損傷の深さ位置の推定やひび割れの幅の推定もできるように、広範な実験条件の基でデータ蓄積を図り、非線形回帰分析も適用して表面ひび割れ測定系および内部損傷測定系にそれぞれ合わせたより詳細な等価回路の考案が望まれる。そして測定値との照合検証と同時に、位相角が負から正に変化するメカニズムを明らかにする必要がある。

本研究では比較的小型な無筋コンクリート試験体を対象としたが、実際の構造物には鉄筋や鉄骨が内包されているのもあり、さらに形状寸法も大きい。このことから、今後実構造物に適用するにあたって、本研究で使用した電圧1Vでは不十分であり、100Vや500Vといったように高電圧による電場を作用させて研究を進めていく必要もあると考えている。

さらに、実際の現場にも適用できるように、機動性の面からプローブとインピーダンス解析器を一体化し、コンクリート水分計のように携帯できる程度に小型化することが必要である。

本研究では当初からプローブの押し当て具合やプローブとそれを手に持った測定者との間に形成される静電容量を排除するために、プローブは手に持たず治具で押し当て実験を進めてきた。しかし、現場で使用するには、測定者がプローブを持つことが必須となることから、再現性を確保した測定および安定した測定を実現することが望ましい。そのため、測定者との電氣的絶縁を図りながら、コンクリート表面含水率計のように測定器を軽く押し当てることで、内部の損傷度を数値で表示し、鉄筋腐食非破壊検出器のように、内部損傷の確率をコンター図で出力できるように実用性のある測定器に向け、継続的に開発をする必要があると考えている。

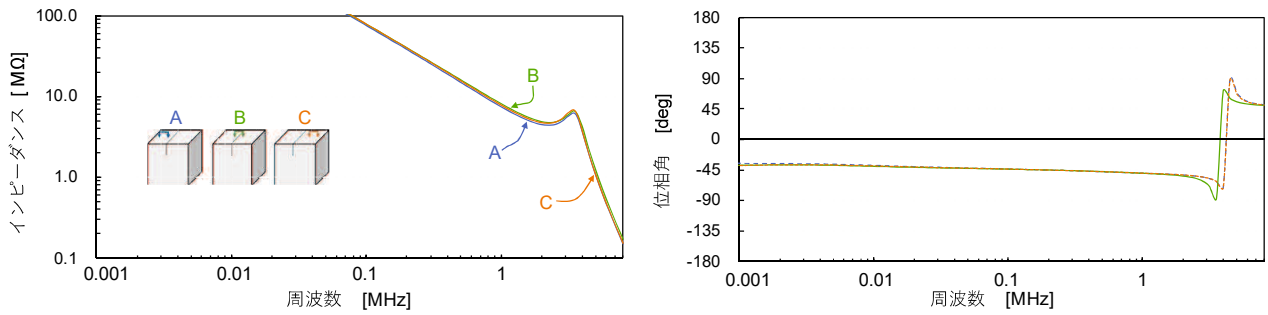
本論文に関する著者の発表論文

- 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, 2021.3.
..... 【本文との関連 : 第4章】
- 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, 第21巻, pp.361-366, 2021.10.
..... 【本文との関連 : 第6章】
- 3) Kenji TADA, Yuji TAKEDA, Hiroaki HASEGAWA and Isamu YOSHITAKE : Crack-Detection in Concrete Covered with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) through Electrical Impedance Variations, *Proceedings of ACMBS-VIII*, 2021.8.
..... 【本文との関連 : 第4章】

付録

本研究で測定されたデータ

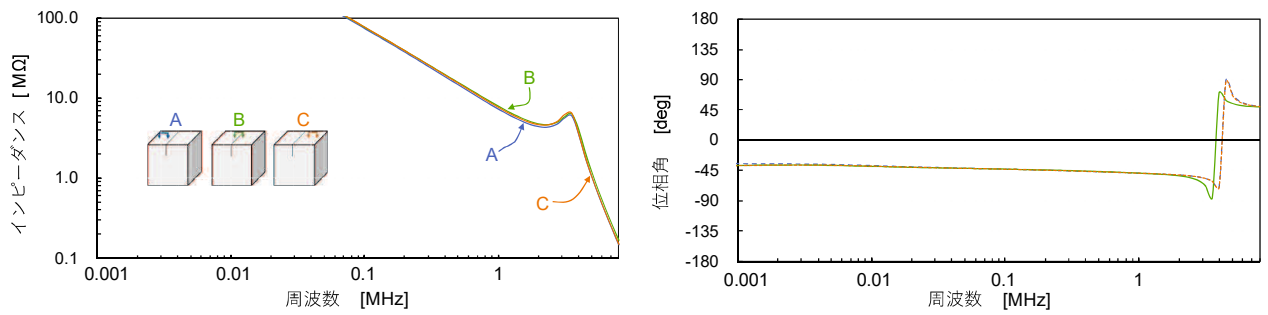
付.1 無被覆 d=50mm スリットコンクリート試験体(1kHz~8MHz)



a) インピーダンス

b) 位相角

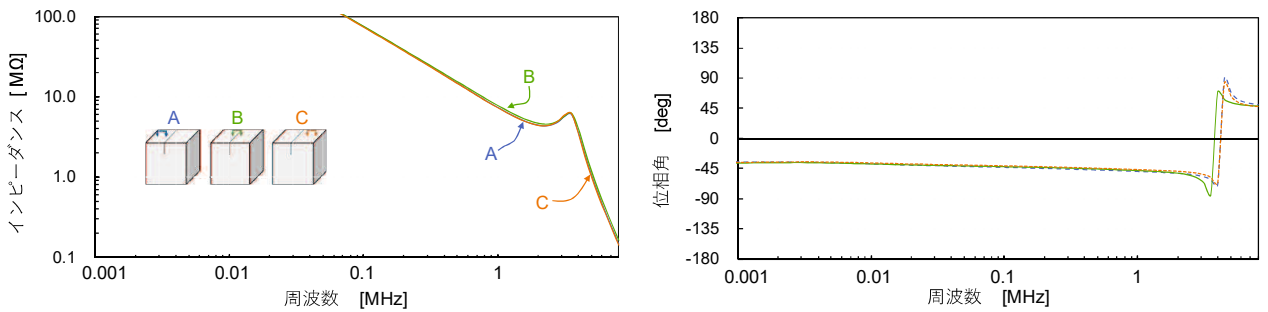
付図 1-1 1回目測定データ



a) インピーダンス

b) 位相角

付図 1-2 2回目測定データ

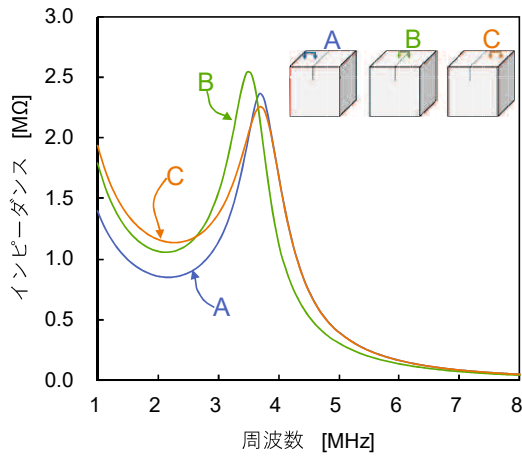


a) インピーダンス

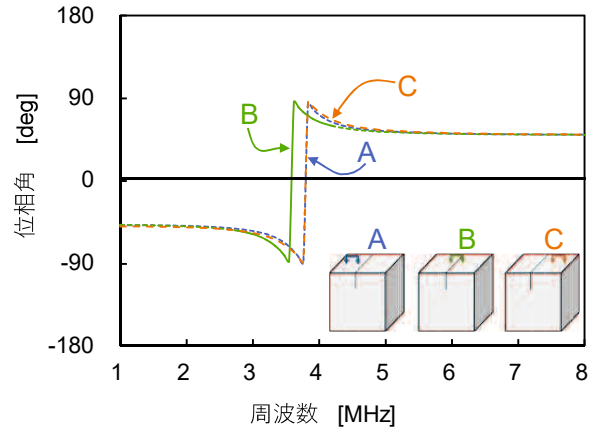
b) 位相角

付図 1-3 2回目測定データ

付.2 無被覆 d=30mm スリットコンクリート試験体

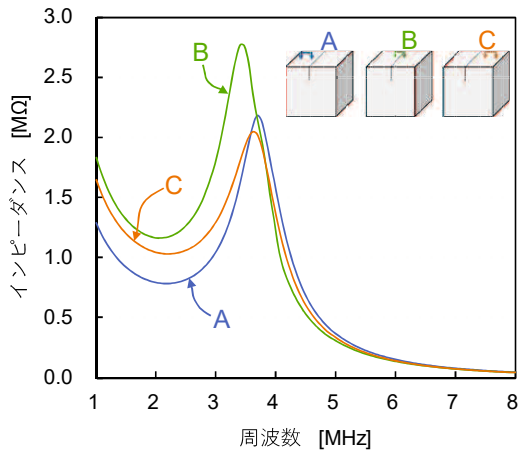


a) インピーダンス

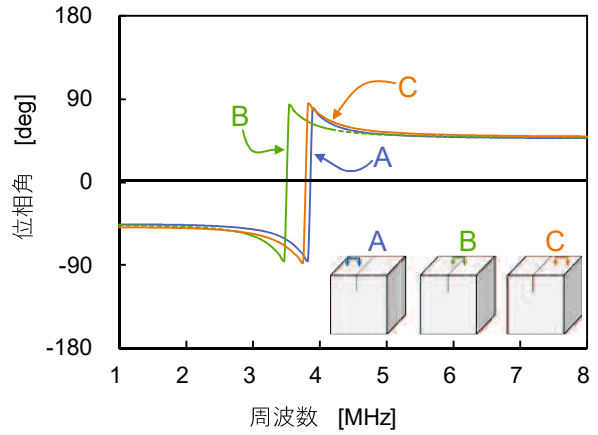


b) 位相角

付図 2-1 1回目測定データ

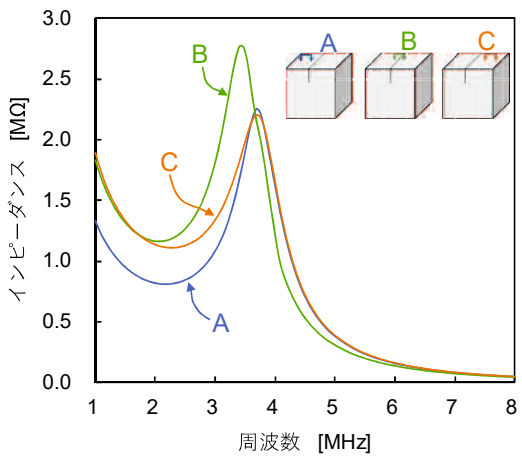


a) インピーダンス

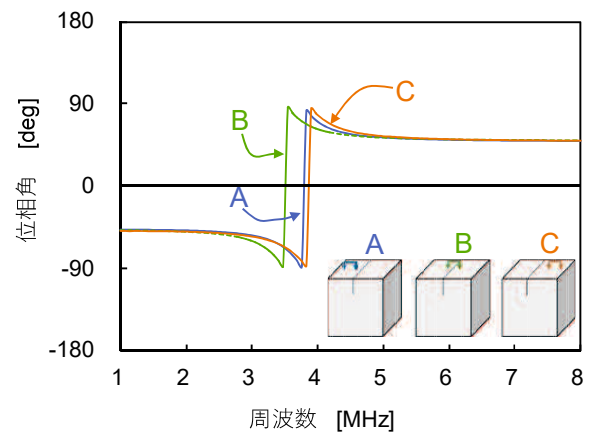


b) 位相角

付図 2-2 2回目測定データ



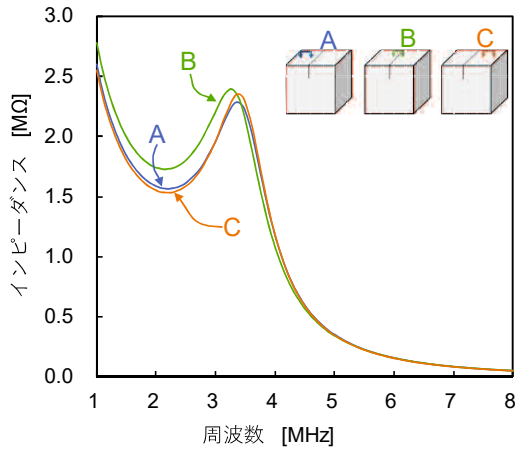
a) インピーダンス



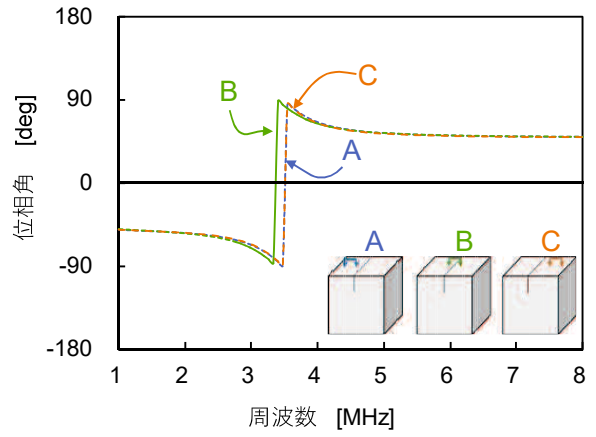
b) 位相角

付図 2-3 3回目測定データ

付.3 無被覆 d=50mm スリットコンクリート試験体

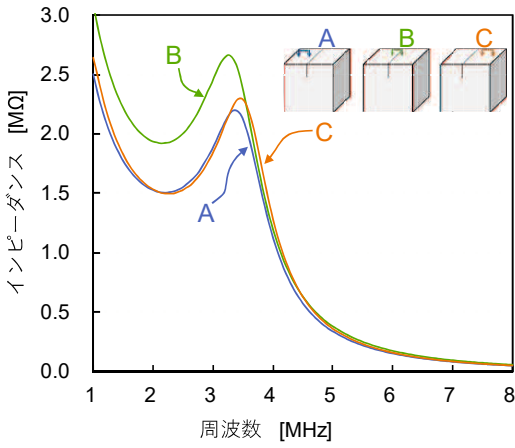


a) インピーダンス

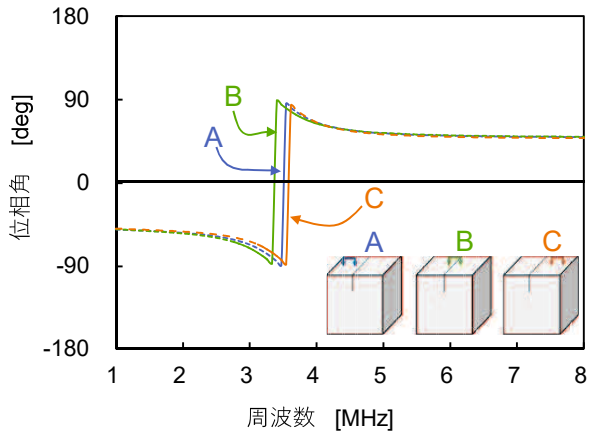


b) 位相角

付図 3-1 1回目測定データ

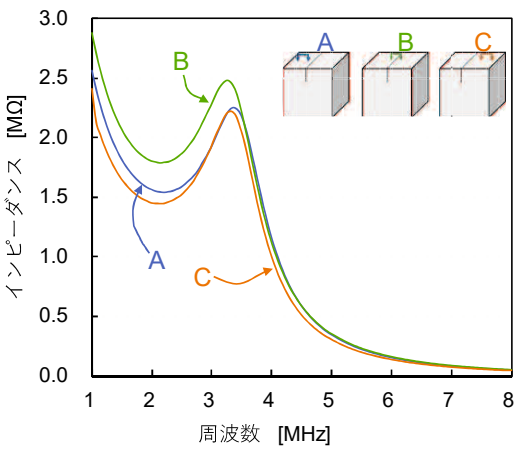


a) インピーダンス

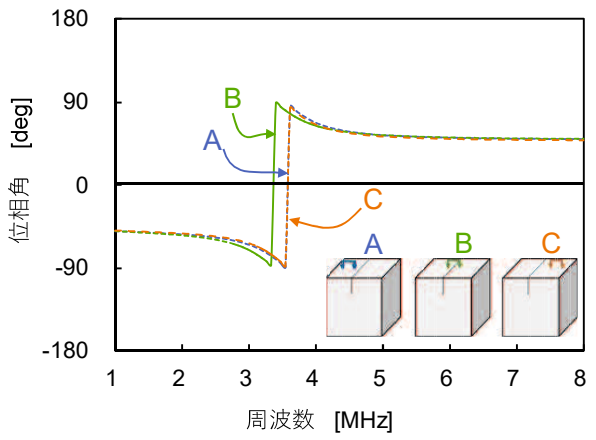


b) 位相角

付図 3-2 2回目測定データ



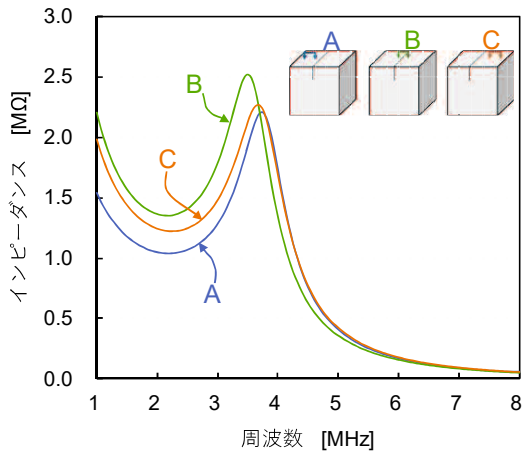
a) インピーダンス



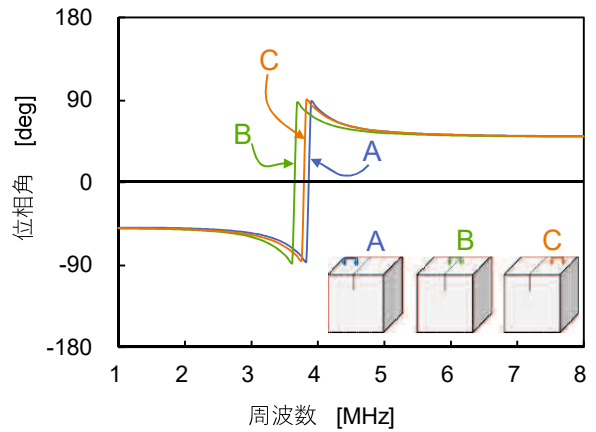
b) 位相角

付図 3-3 3回目測定データ

付.4 無被覆 d=100mm スリットコンクリート試験体

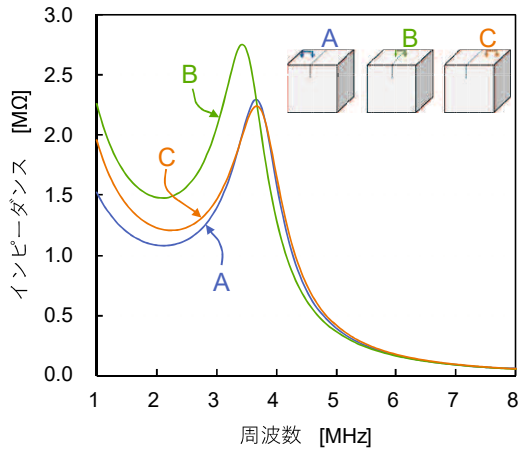


a) インピーダンス

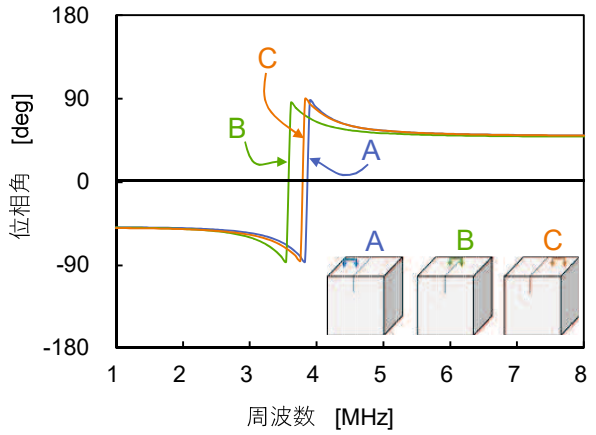


b) 位相角

付図 4-1 1 回目測定データ

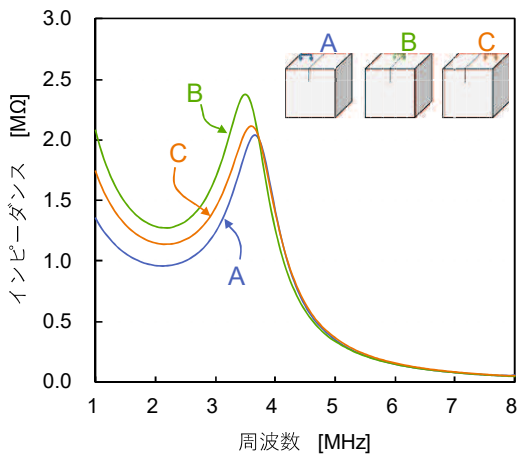


a) インピーダンス

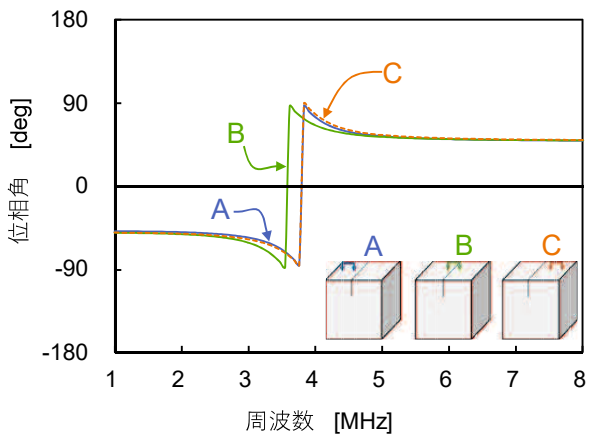


b) 位相角

付図 4-2 2 回目測定データ



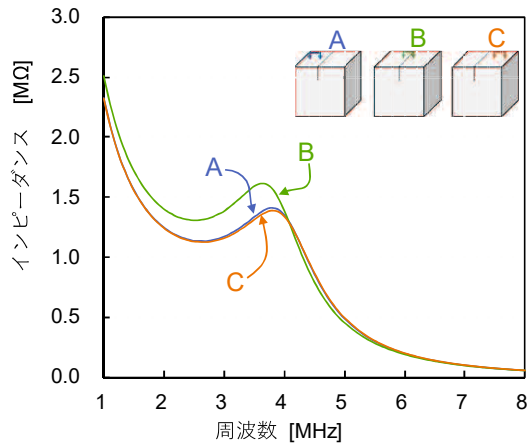
a) インピーダンス



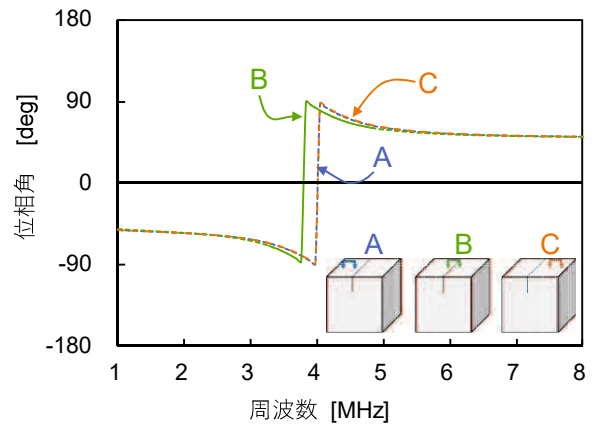
b) 位相角

付図 4-3 3 回目測定データ

付.5 CFRP 被覆(ドライシート厚0.167mm) d=50mm スリットコンクリート試験体

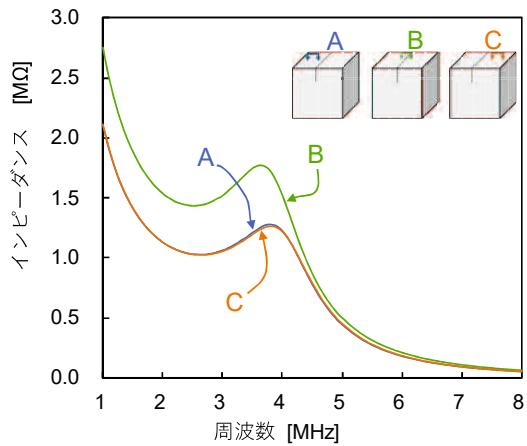


a) インピーダンス

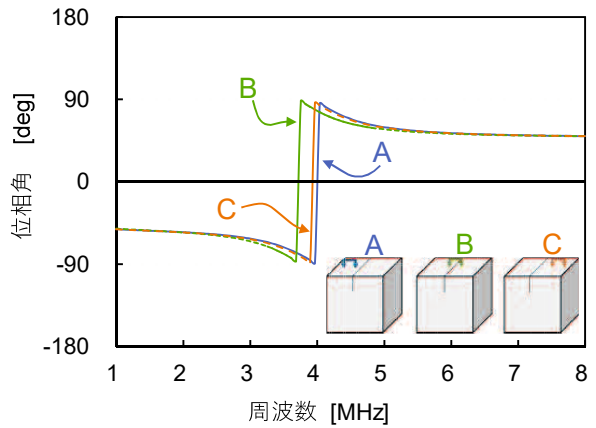


b) 位相角

付図 5-1 1回目測定データ

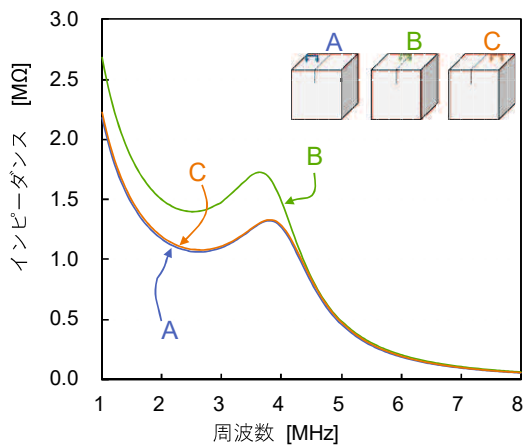


a) インピーダンス

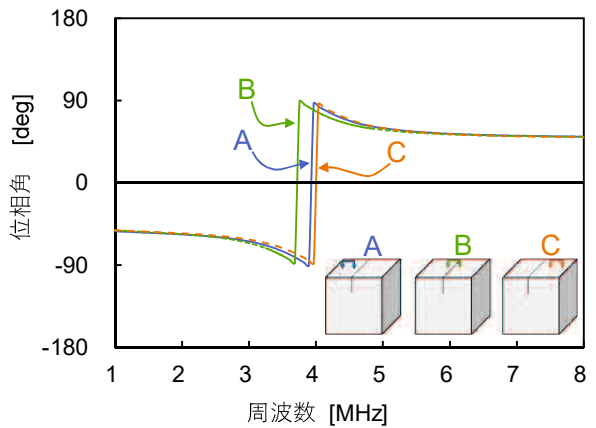


b) 位相角

付図 5-2 2回目測定データ



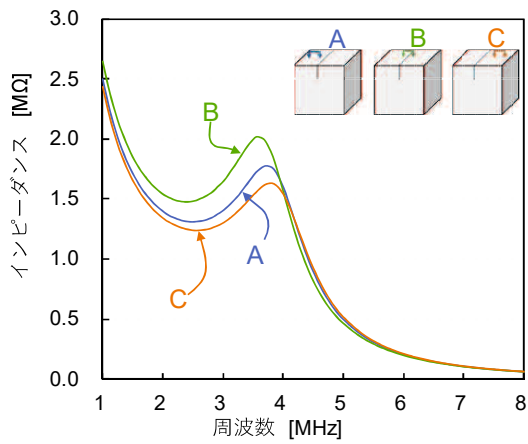
a) インピーダンス



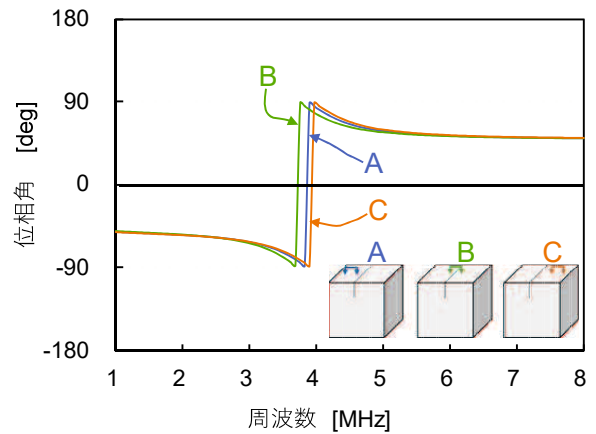
b) 位相角

付図 5-3 3回目測定データ

付.6 CFRP 被覆(ドライシート厚 0.333mm) d=50mm スリットコンクリート試験体

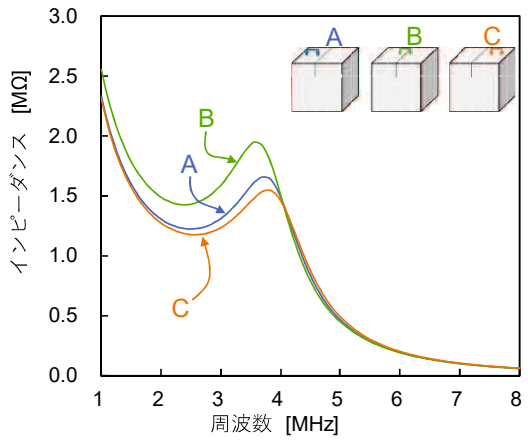


a) インピーダンス

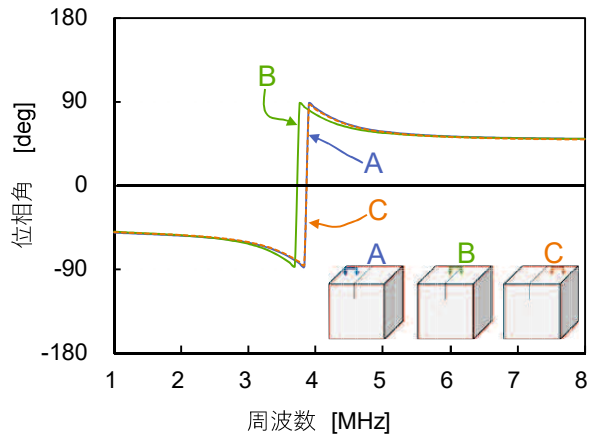


b) 位相角

付図 6-1 1 回目測定データ

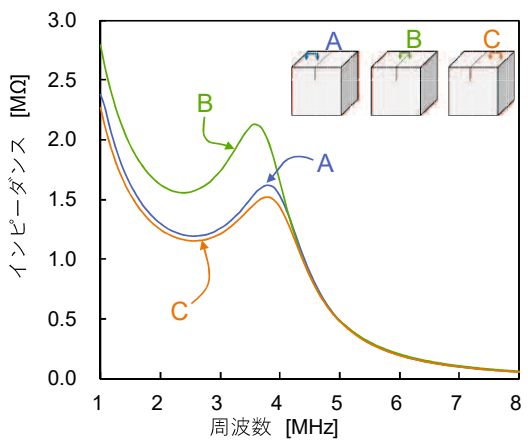


a) インピーダンス

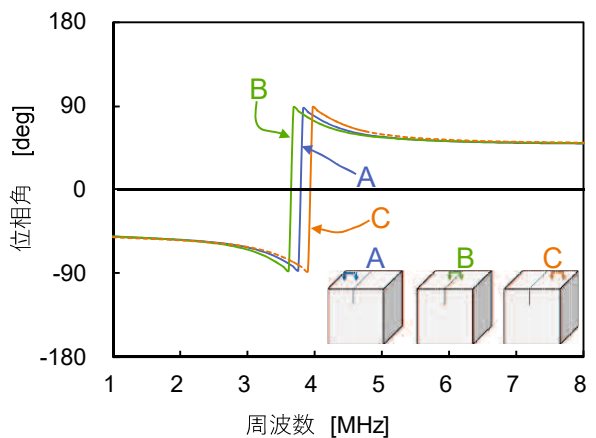


b) 位相角

付図 6-2 2 回目測定データ



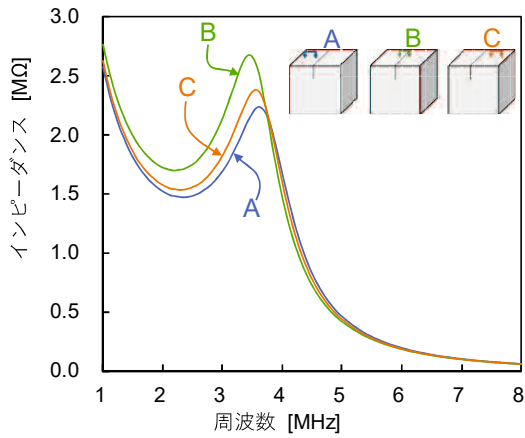
a) インピーダンス



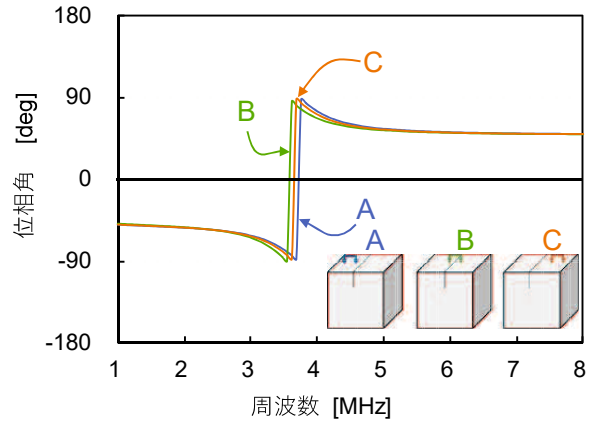
b) 位相角

付図 6-3 3 回目測定データ

付.7 AFRP 被覆(ドライシート厚 0.286mm) d=50mm スリットコンクリート試験体

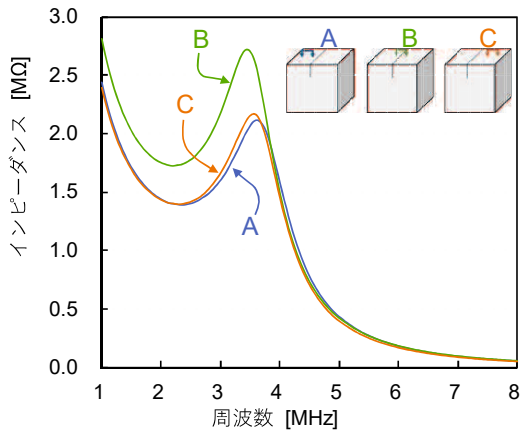


a) インピーダンス

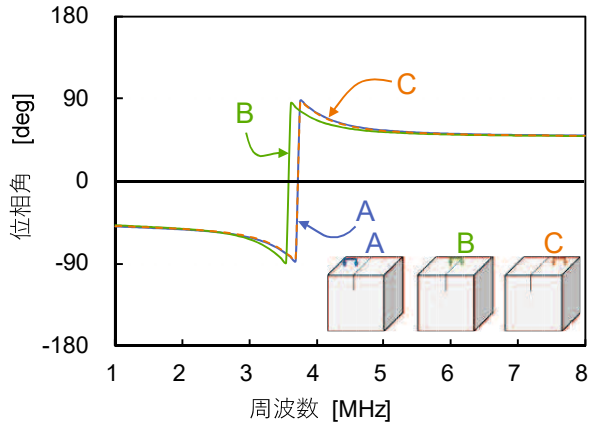


b) 位相角

付図 7-1 1 回目測定データ

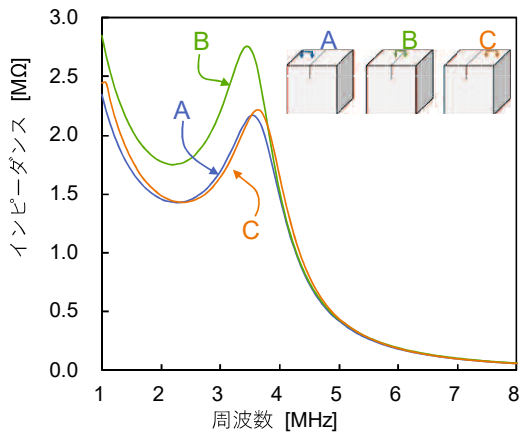


a) インピーダンス

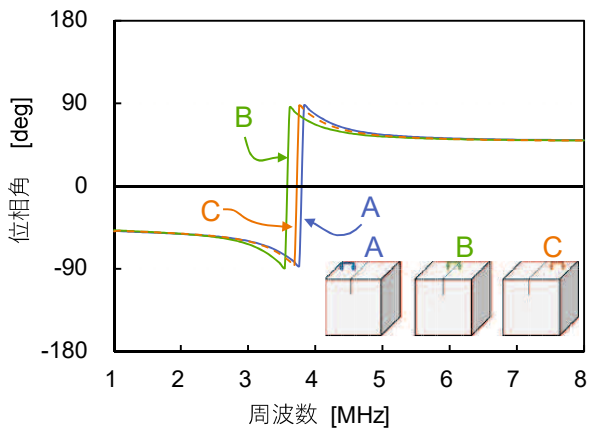


b) 位相角

付図 7-2 2 回目測定データ



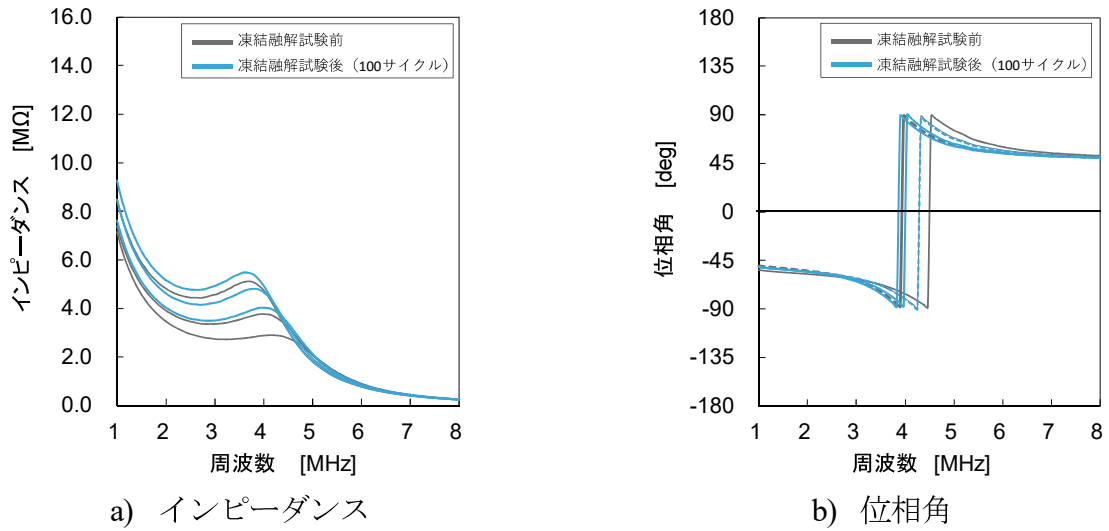
a) インピーダンス



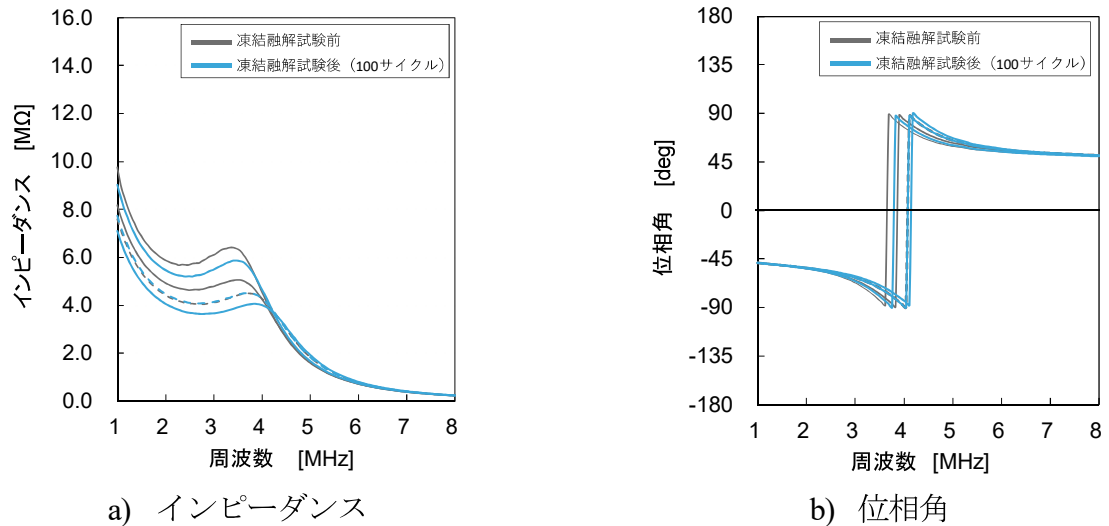
b) 位相角

付図 7-3 3 回目測定データ

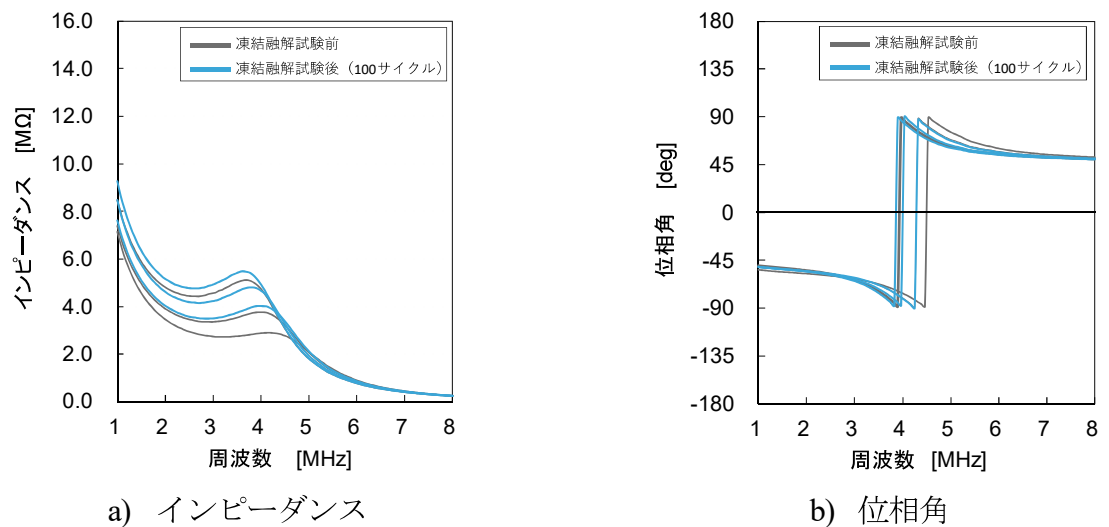
付.8 4面 CFRP 被覆コンクリート試験体 TP-F100-1 凍結融解サイクル100回 A-A' 面測定



付図 8-1 測定点 a(左中央部)測定データ

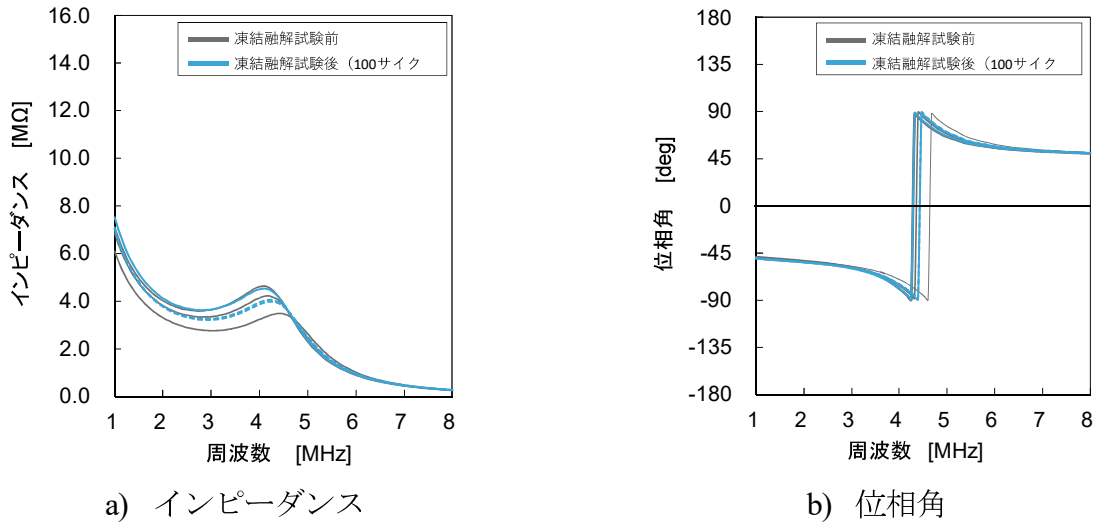


付図 8-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

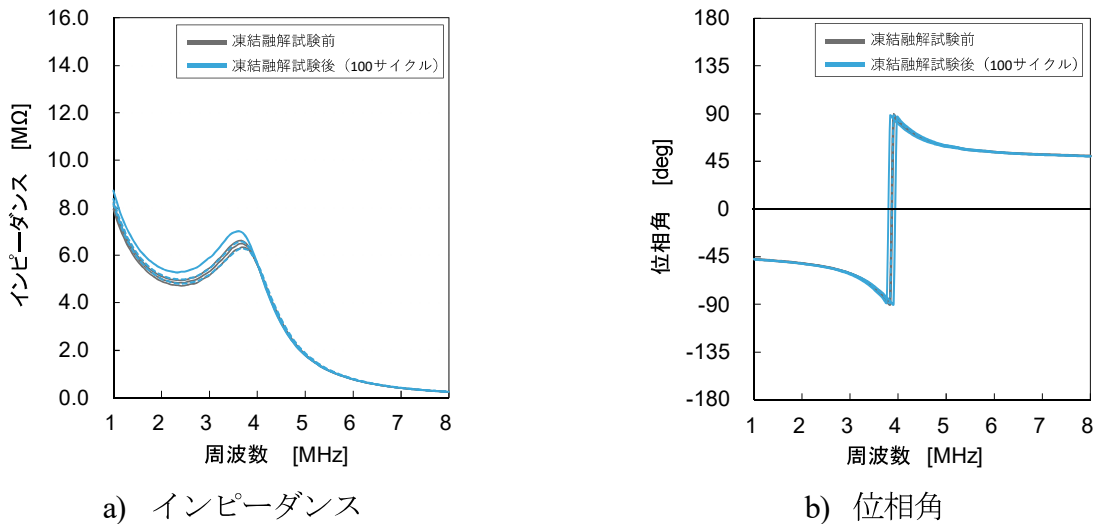


付図 8-3 測定点 c(右中央部)測定データ

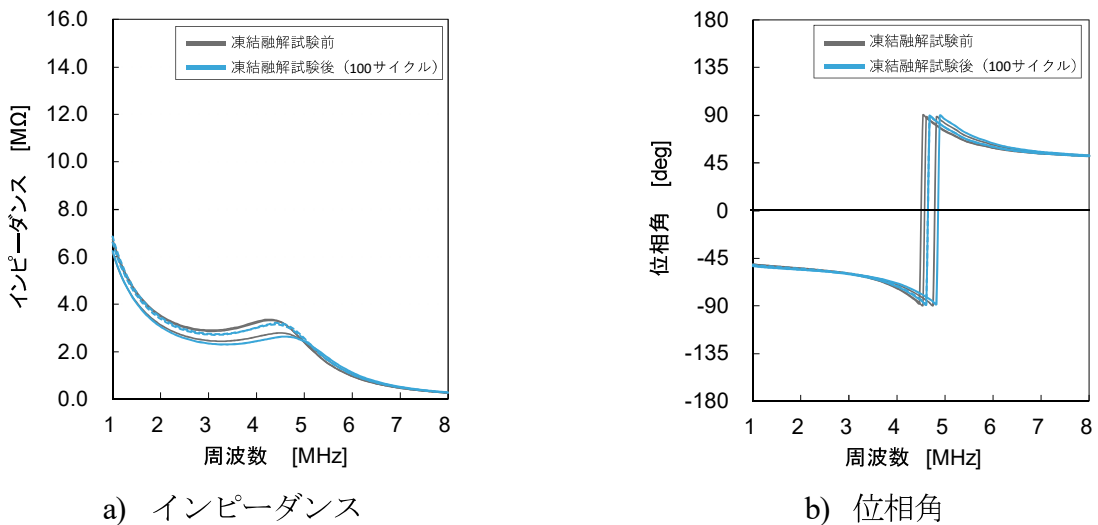
付.9 4面 CFRP 被覆コンクリート試験体 TP-F100-1 凍結融解サイクル 100 回 B-B' 面測定



付図 9-1 測定点 a(左中央部)測定データ

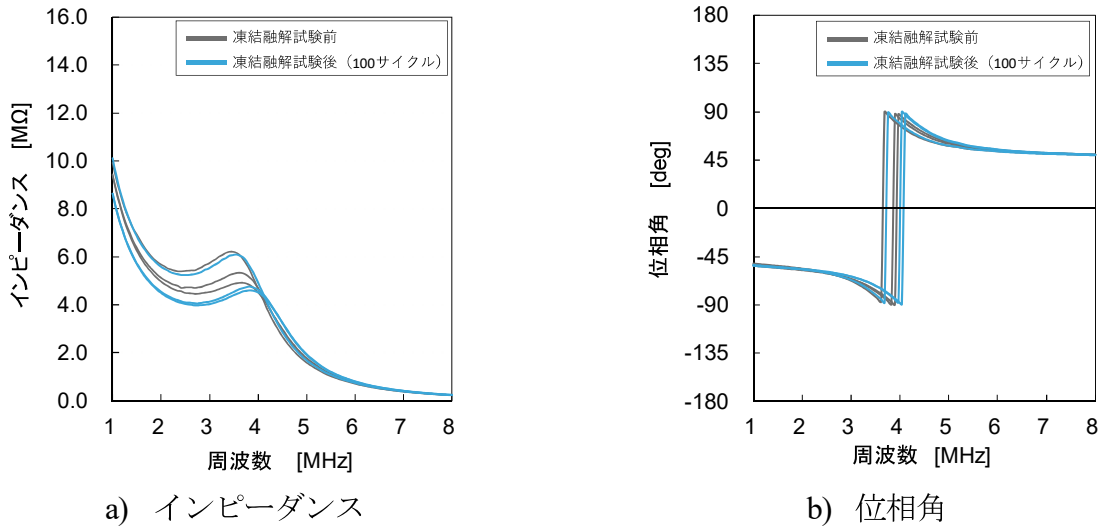


付図 9-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

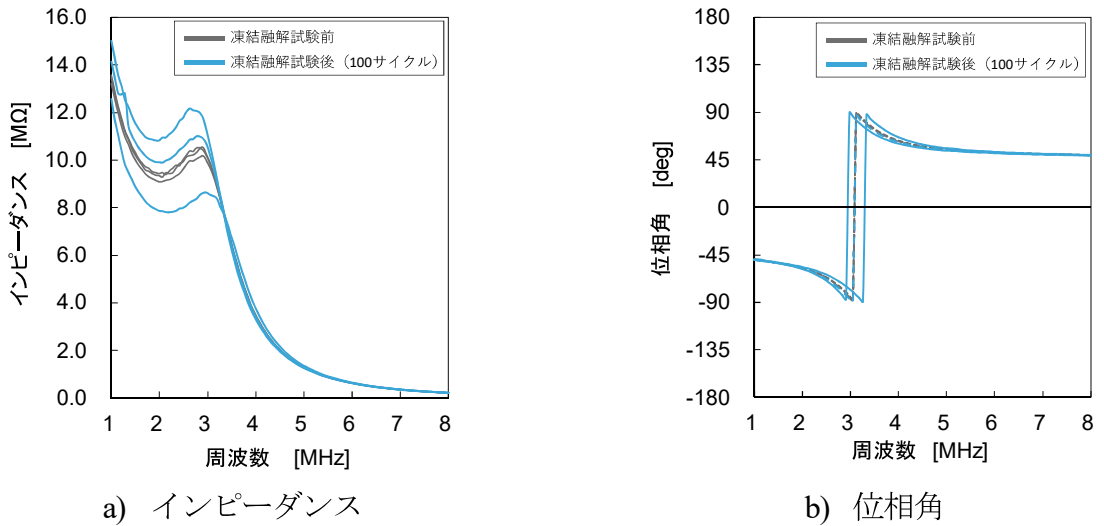


付図 9-3 測定点 c(右中央部)測定データ

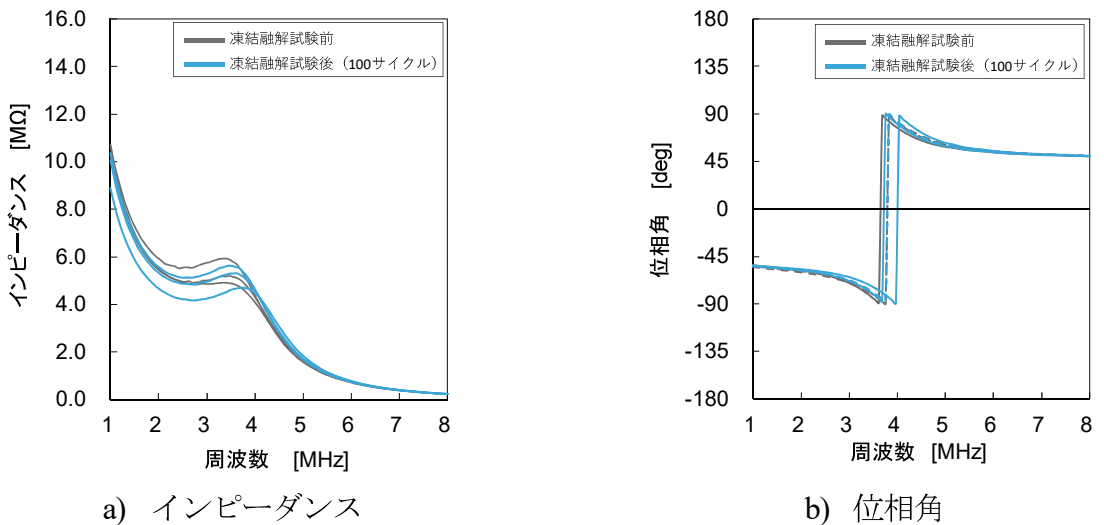
付.10 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F100-2 凍結融解サイクル100回 A-A'面測定



付図 10-1 測定点 a(左中央部)測定データ

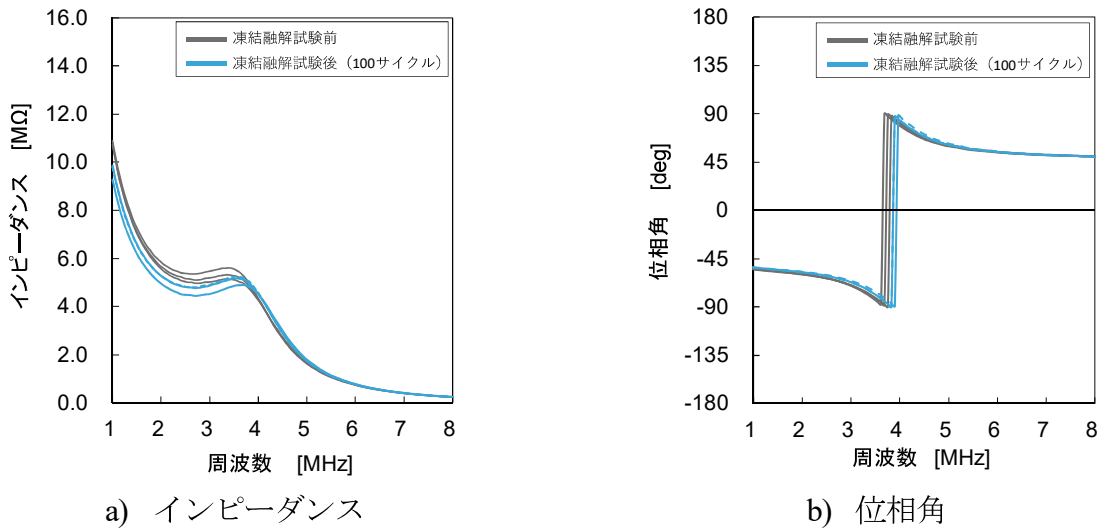


付図 10-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

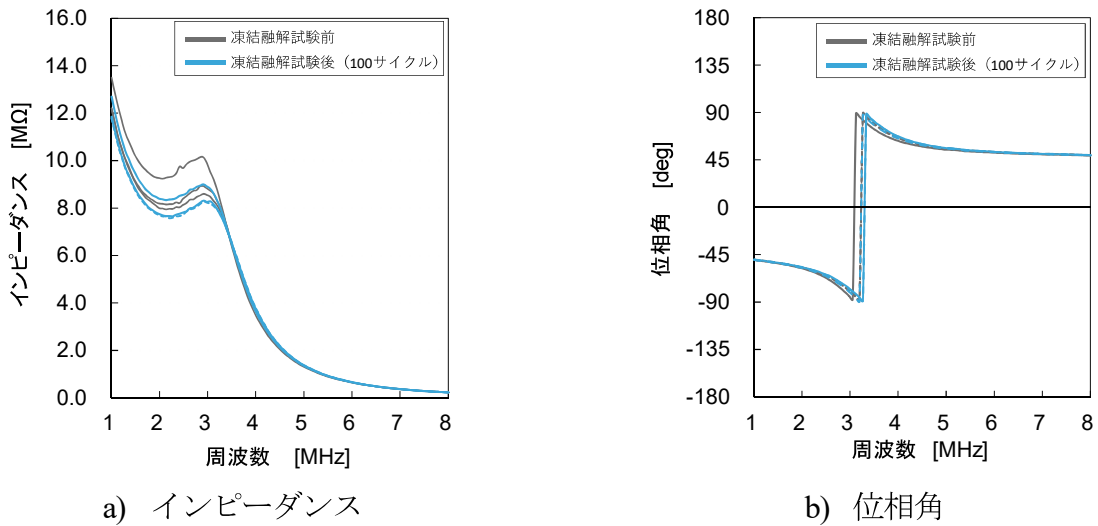


付図 10-3 測定点 c(右中央部)測定データ

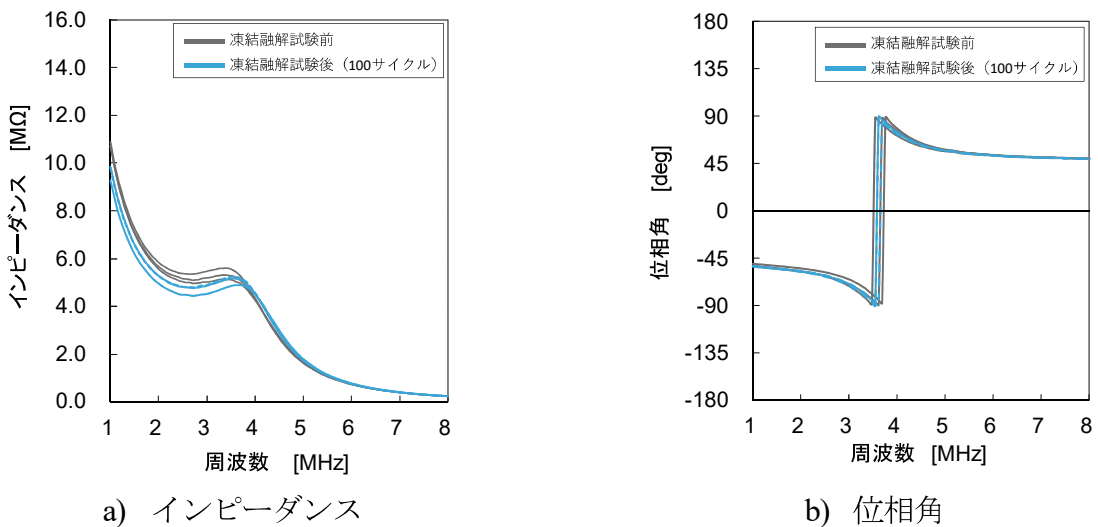
付.11 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F100-2 凍結融解サイクル100回 B-B'面測定



付図 11-1 測定点 a(左中央部)測定データ



付図 11-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ



付図 11-3 測定点 c(右中央部)測定データ

付.12 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F100-3 凍結融解サイクル100回 A-A'面測定

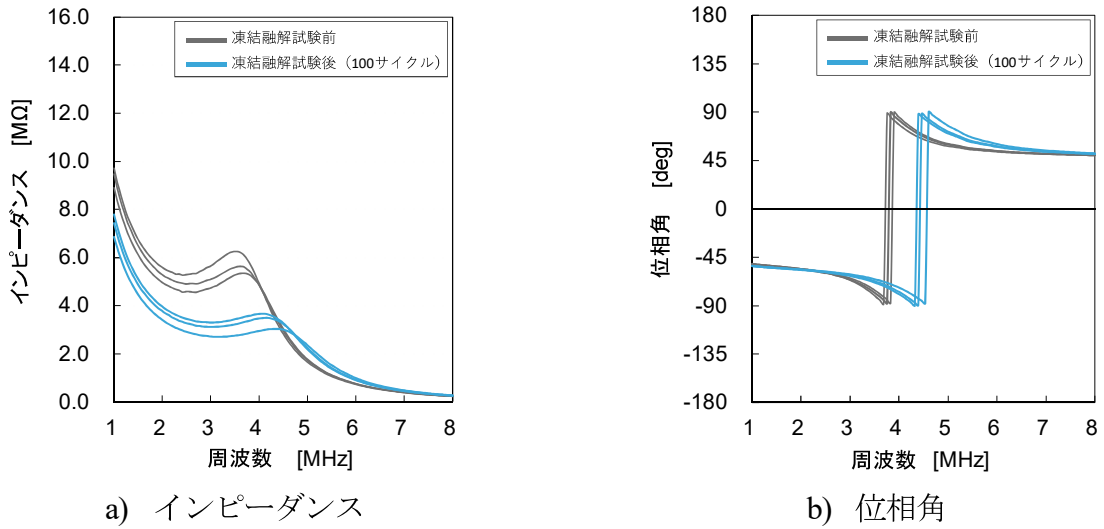


図 12-1 測定点 a(左中央部)測定データ

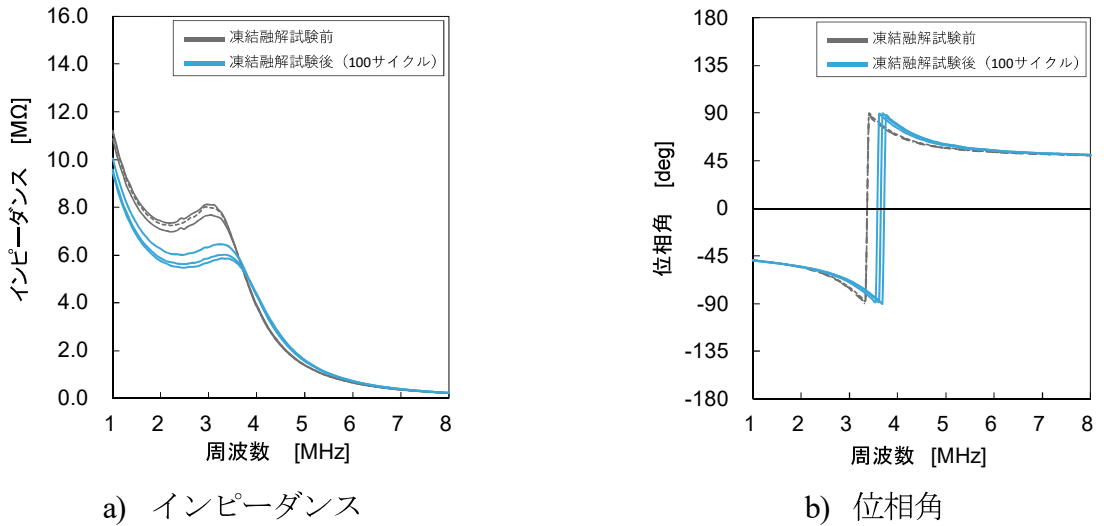


図 12-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

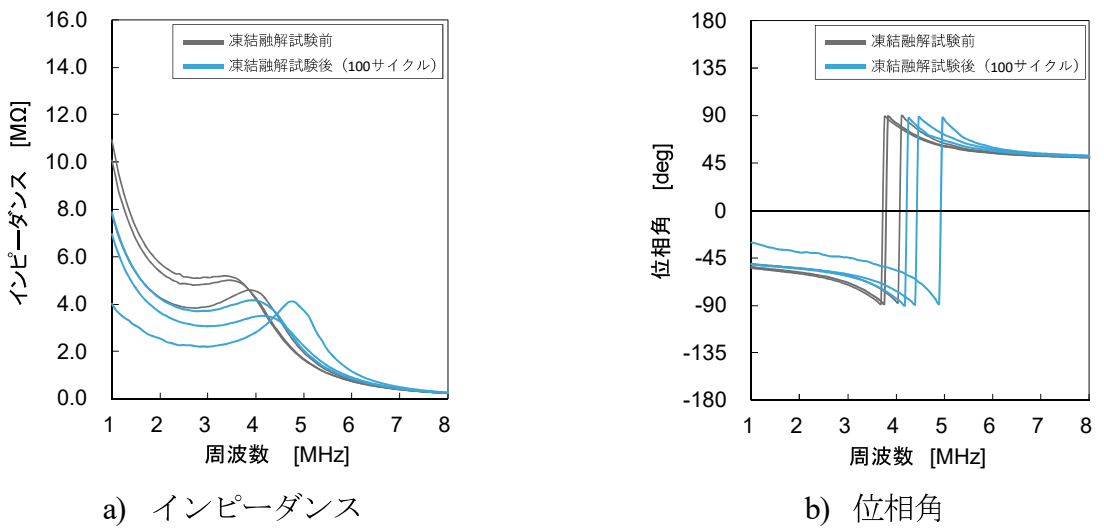
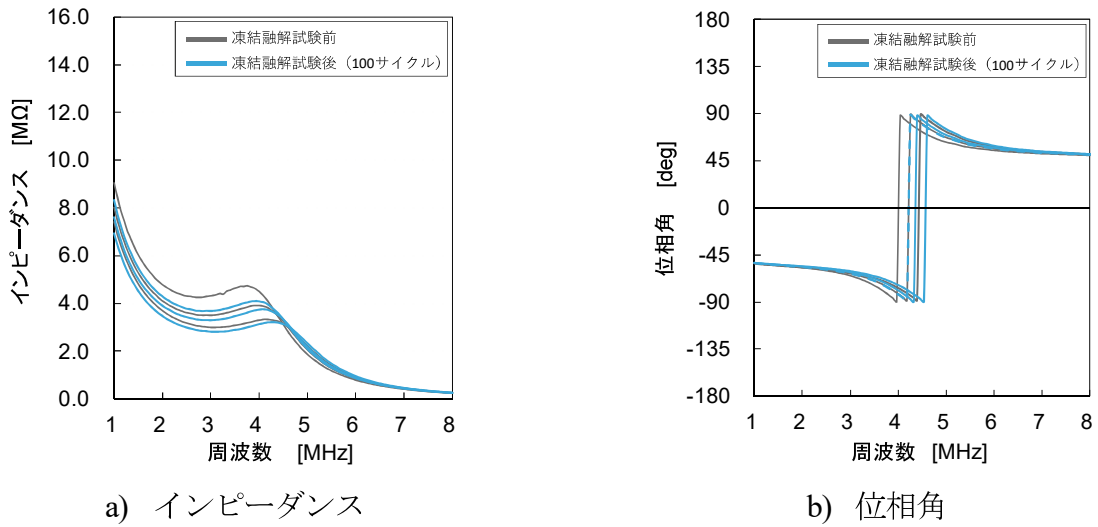
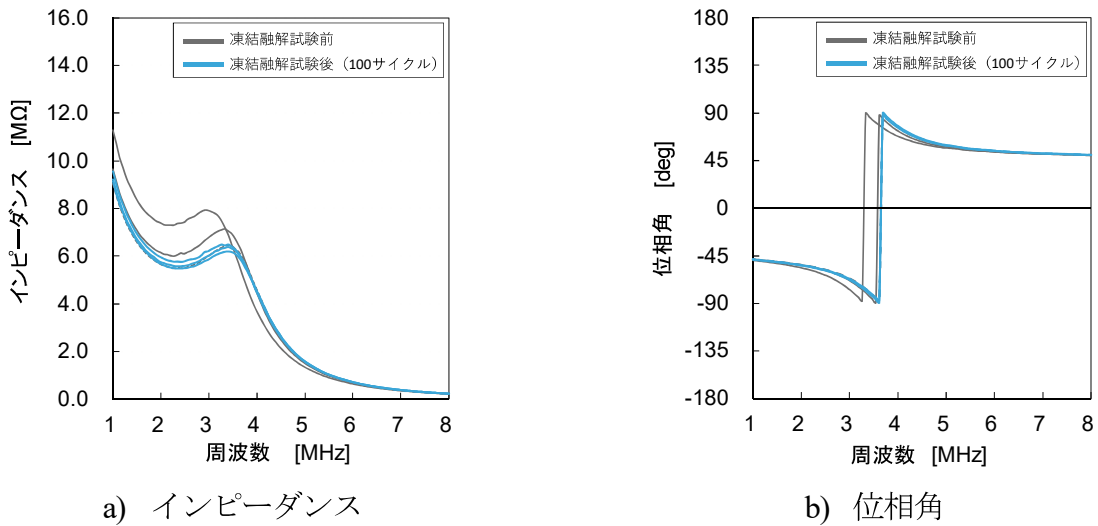


図 12-3 測定点 c(右中央部)測定データ

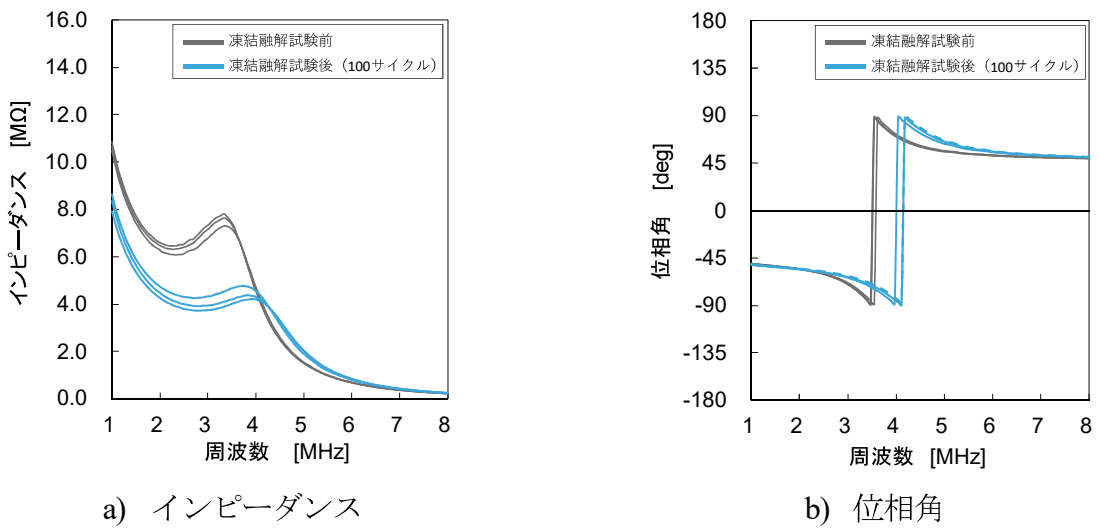
付.13 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F100-3 凍結融解サイクル100回 B-B'面測定



付図 13-1 測定点 a(左中央部)測定データ

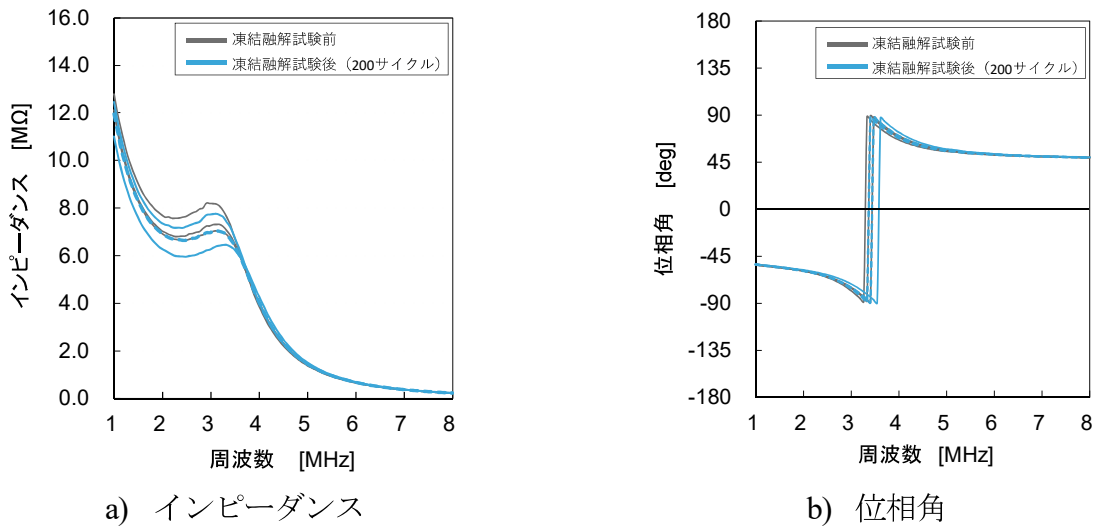


付図 13-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

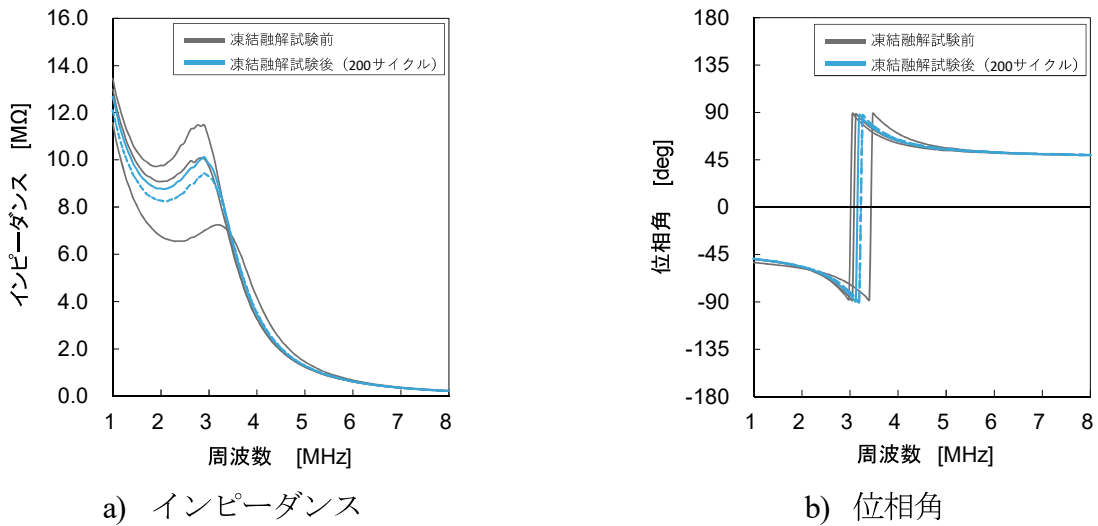


付図 13-3 測定点 c(右中央部)測定データ

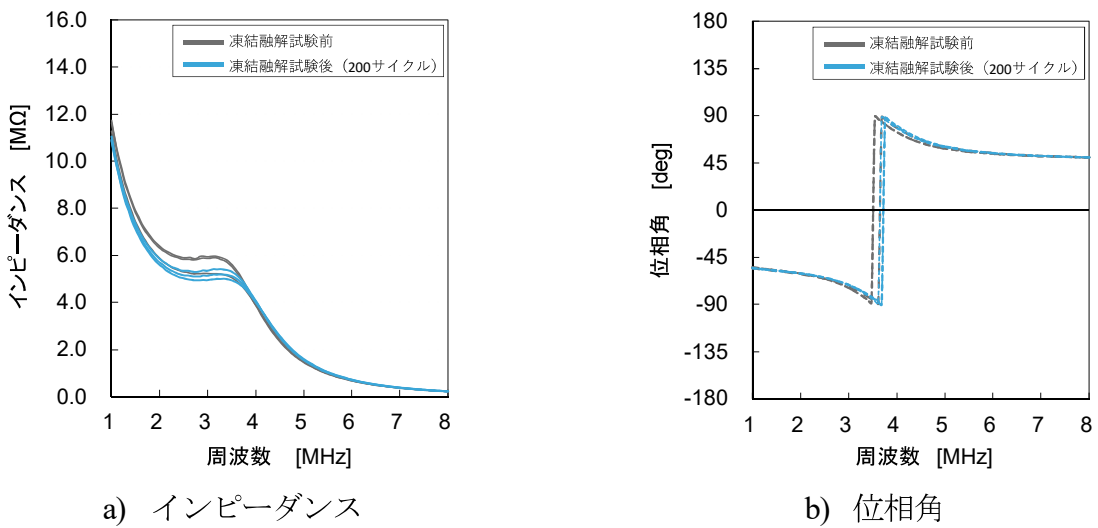
付.14 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F200-1 凍結融解サイクル200回 A-A'面測定



付図 14-1 測定点 a(左中央部)測定データ

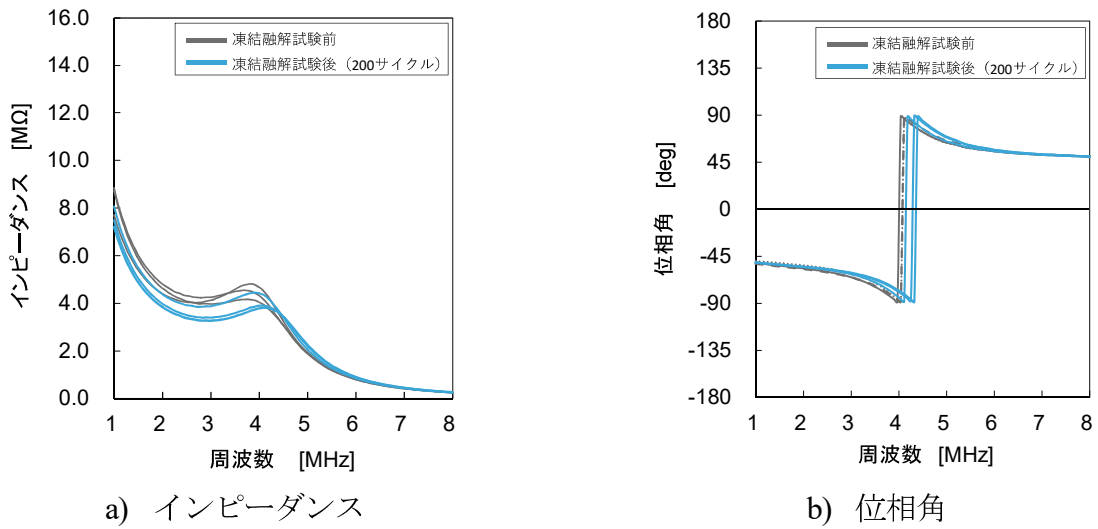


付図 14-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

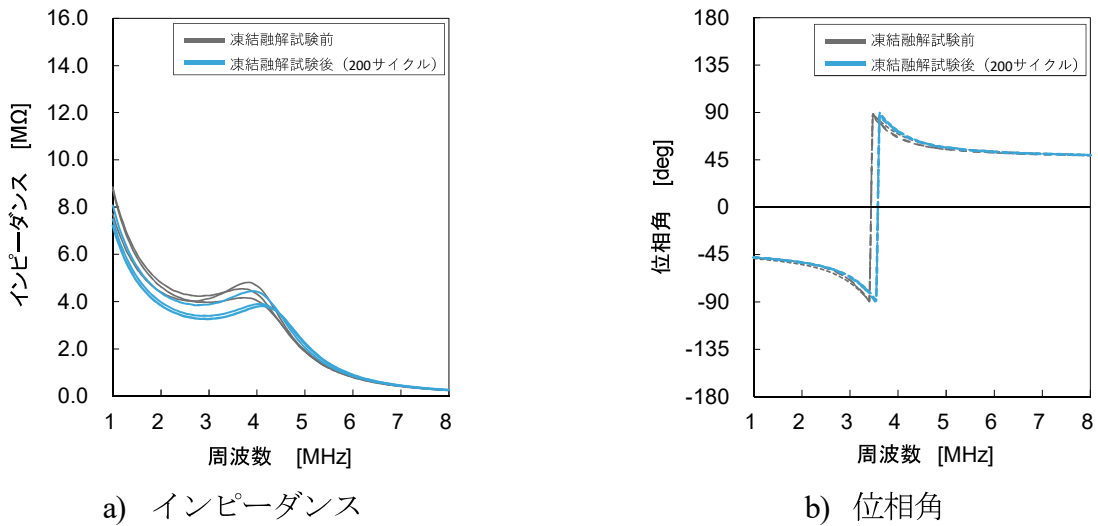


付図 14-3 測定点 c(右中央部)測定データ

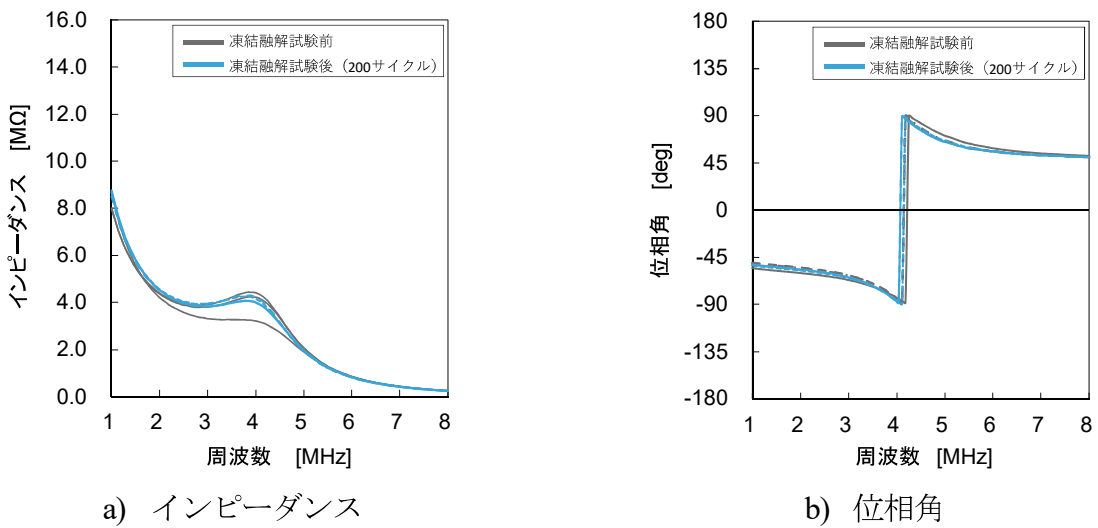
付.15 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F200-1 凍結融解サイクル200回 B-B' 面測定



付図 15-1 測定点 a(左中央部)測定データ

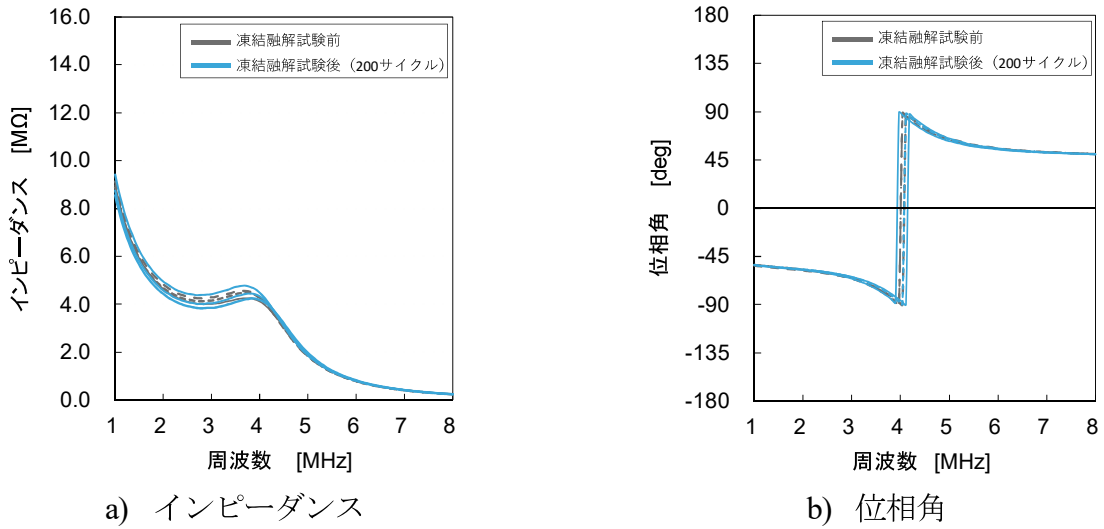


付図 15-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

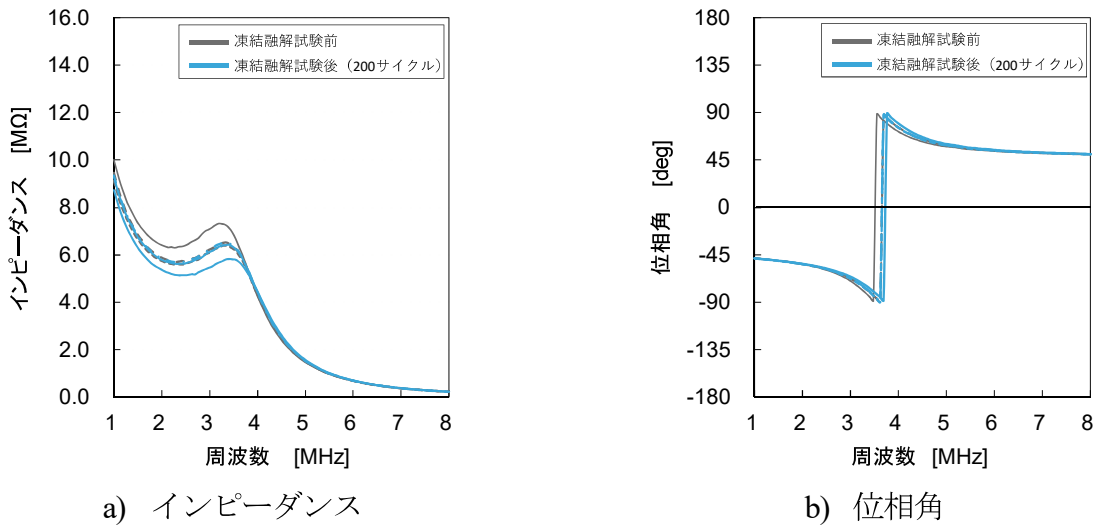


付図 15-3 測定点 c(右中央部)測定データ

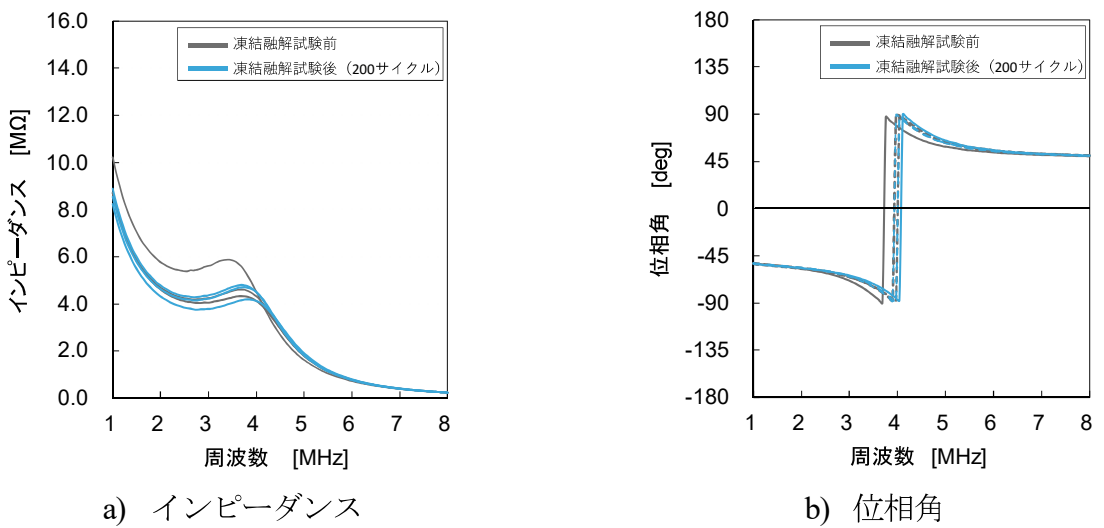
付.16 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F200-2 凍結融解サイクル200回 A-A'面測定



付図 16-1 測定点 a(左中央部)測定データ

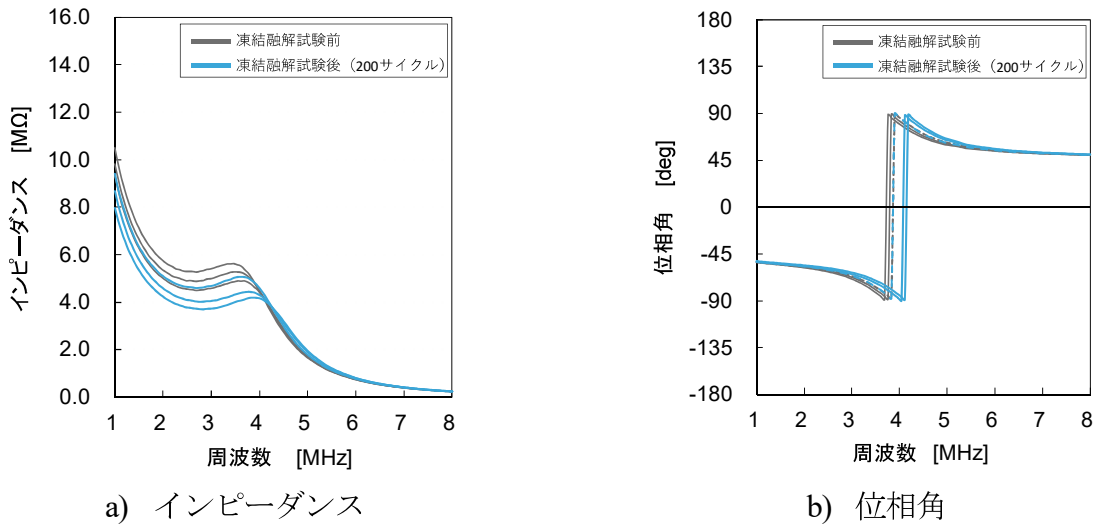


付図 16-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

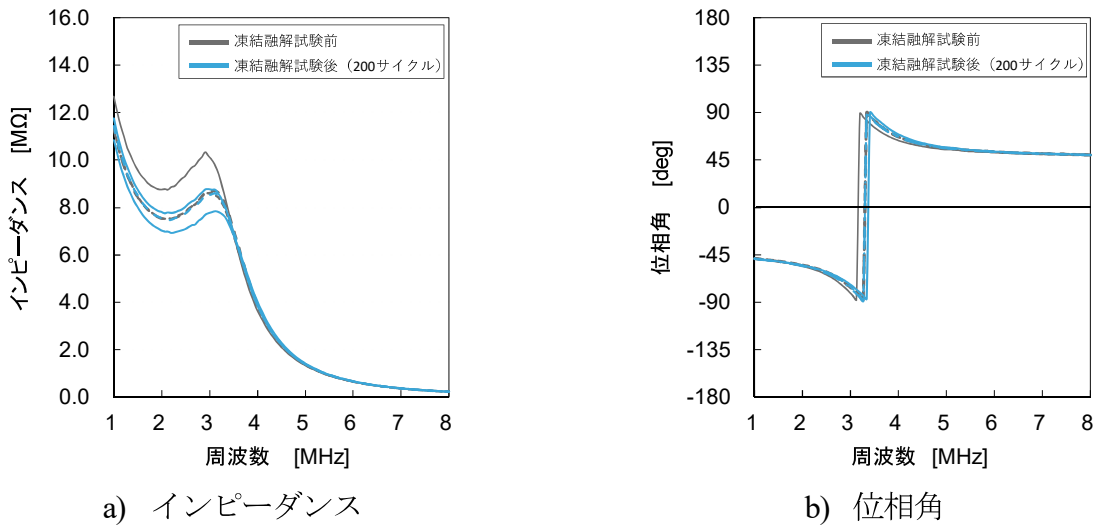


付図 16-3 測定点 c(右中央部)測定データ

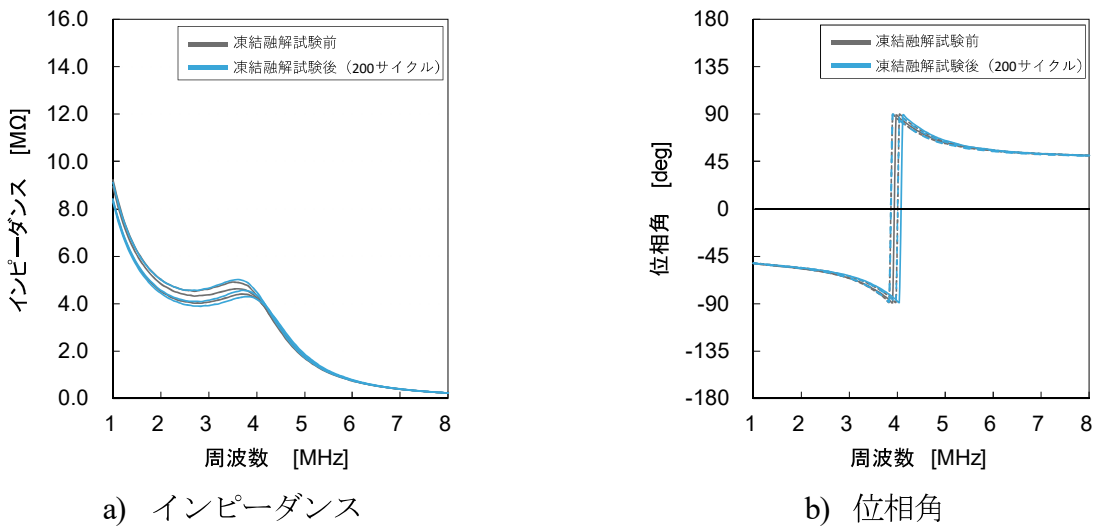
付.17 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F200-2 凍結融解サイクル200回 B-B'面測定



付図 17-1 測定点 a(左中央部)測定データ

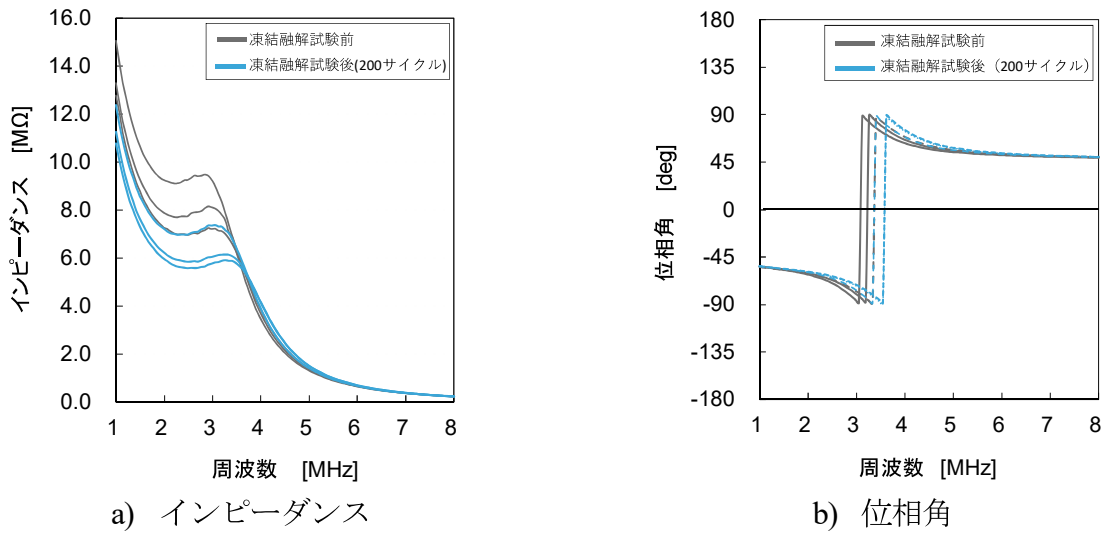


付図 17-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

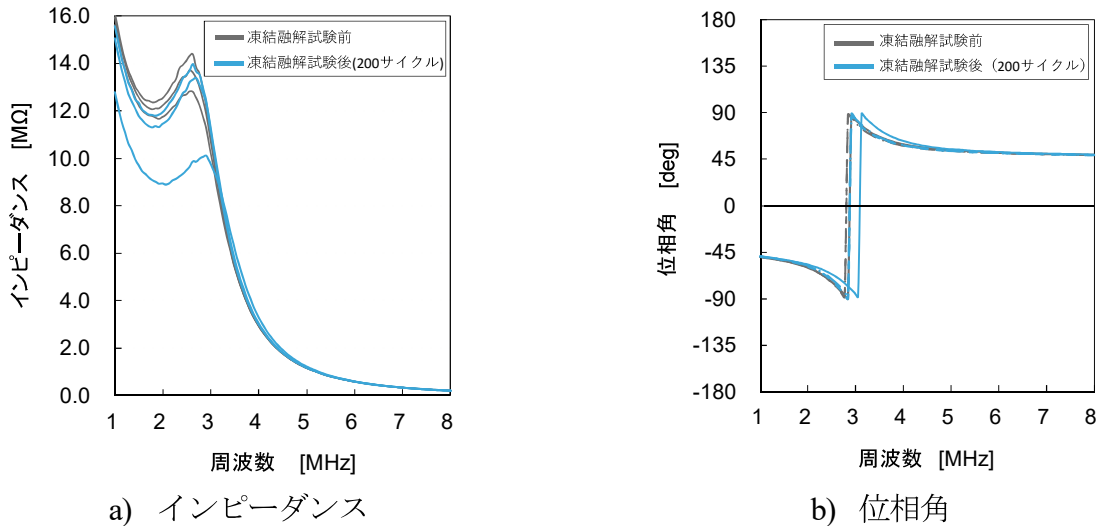


付図 17-3 測定点 c(右中央部)測定データ

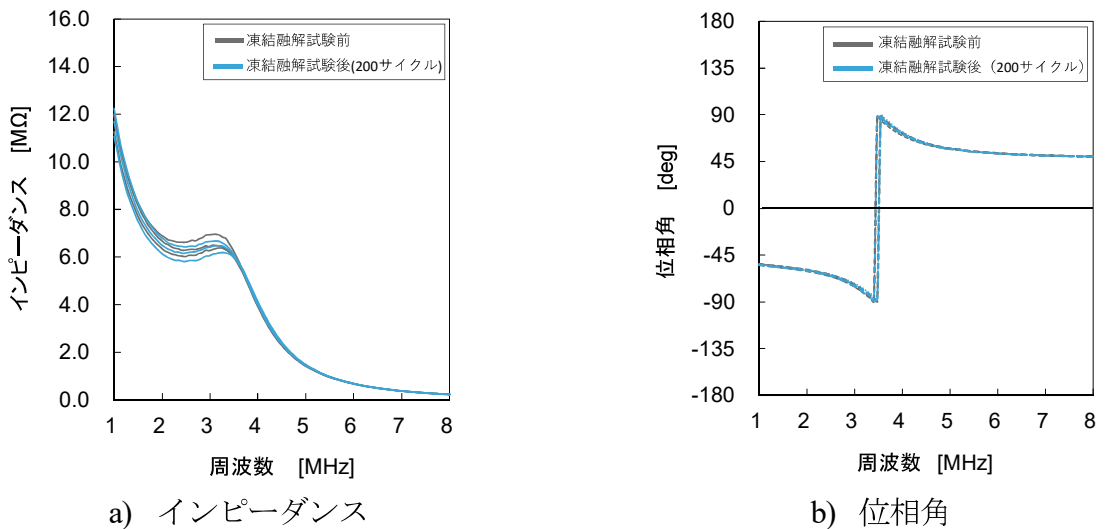
付.18 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F200-3 凍結融解サイクル200回 A-A'面測定



付図 18-1 測定点 a(左中央部)測定データ

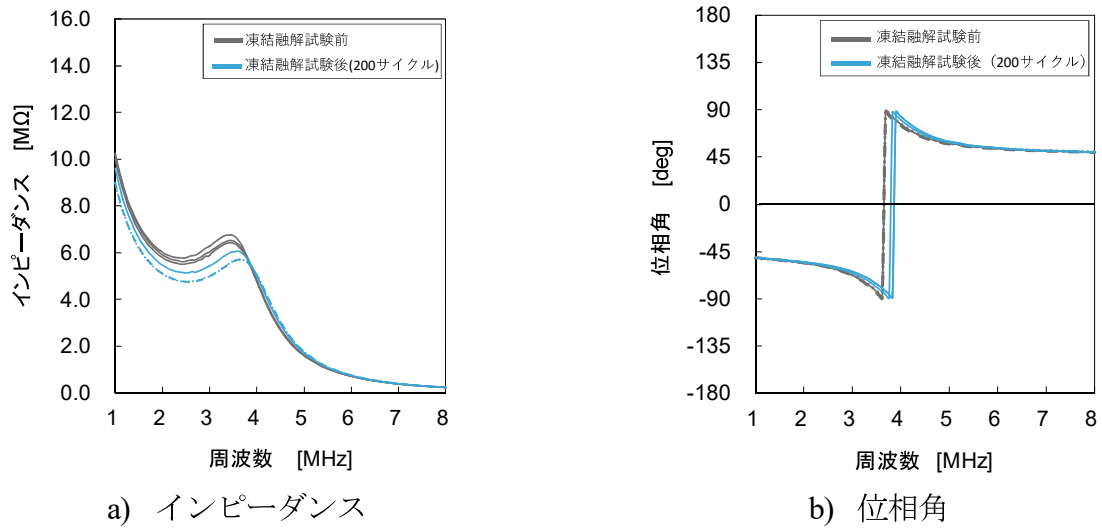


付図 18-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

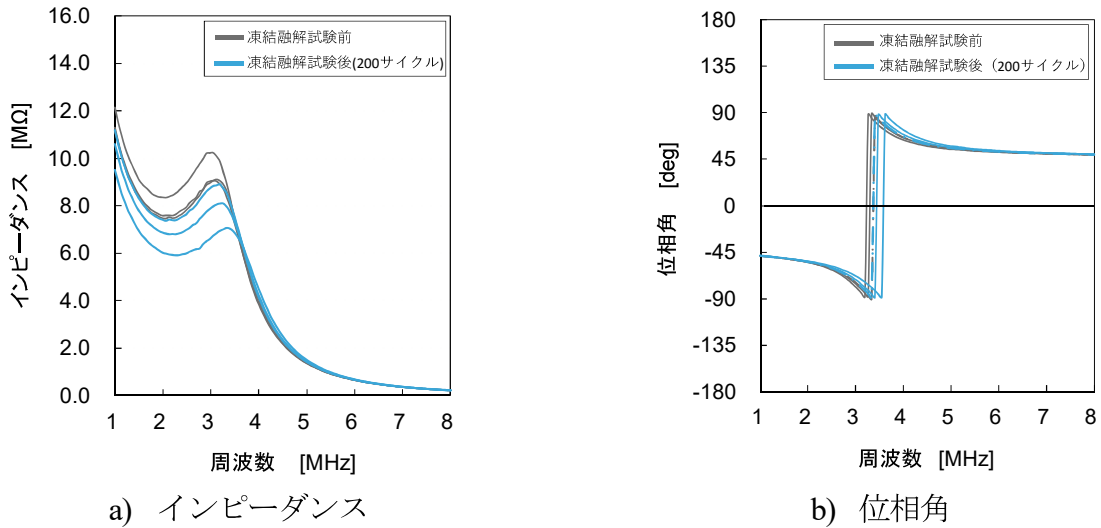


付図 18-3 測定点 c(右中央部)測定データ

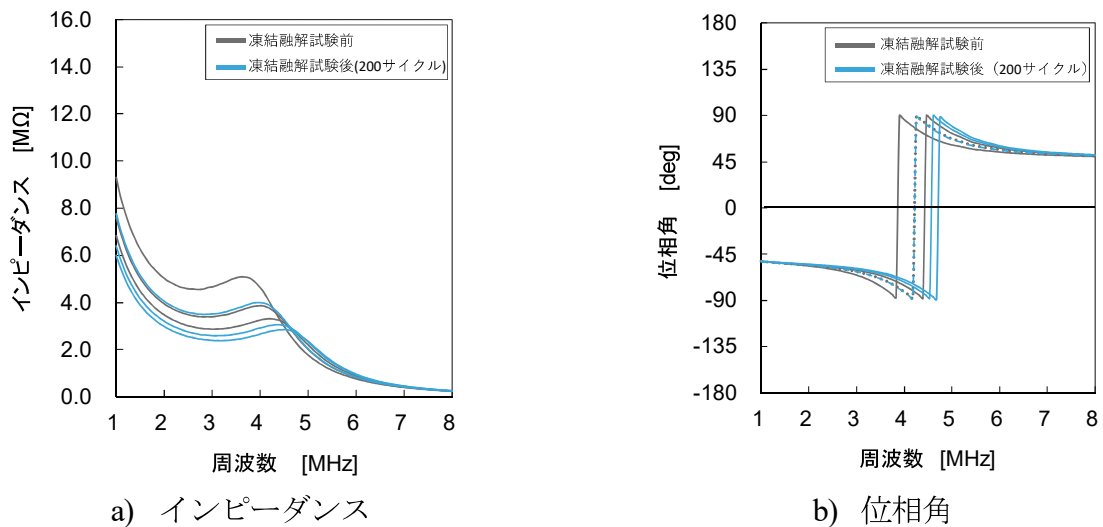
付.19 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F200-3 凍結融解サイクル200回 B-B'面測定



付図 19-1 測定点 a(左中央部)測定データ

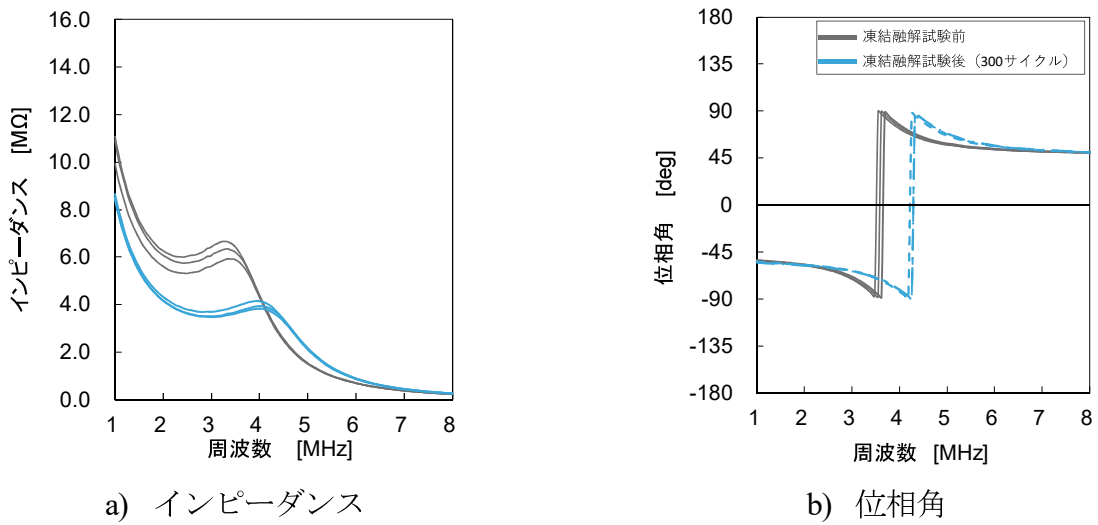


付図 19-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

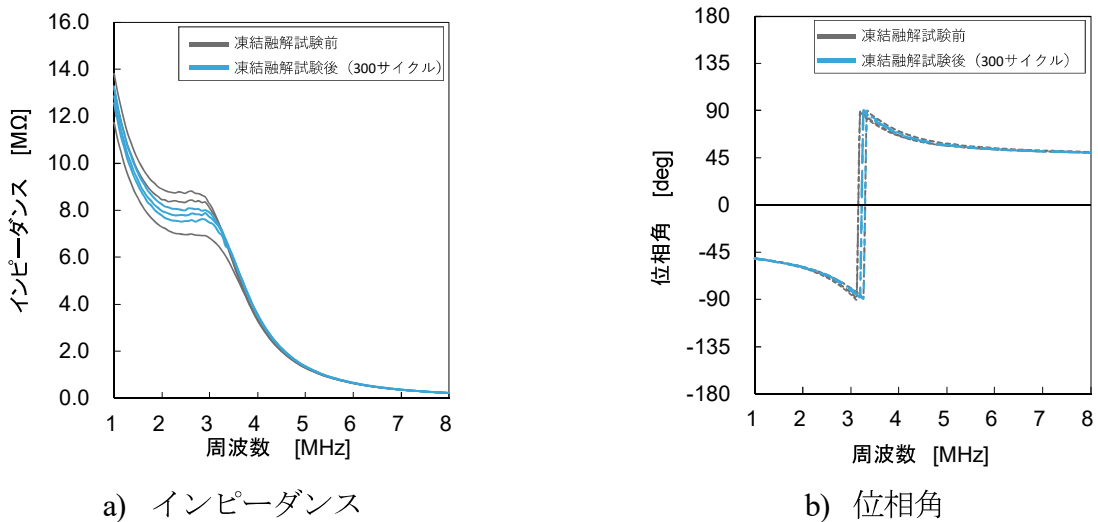


付図 19-3 測定点 c(右中央部)測定データ

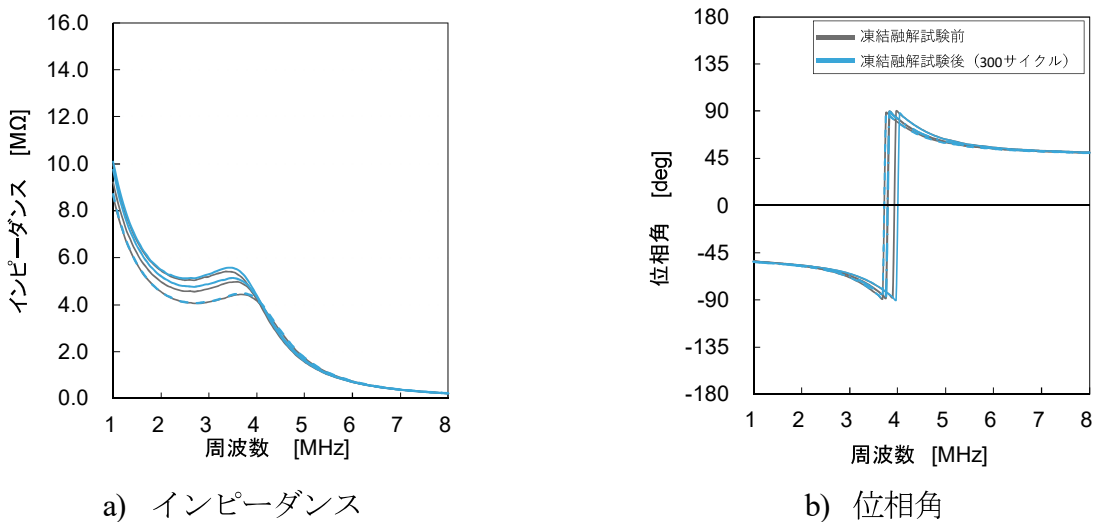
付.20 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F300-1 凍結融解サイクル300回 A-A'面測定



付図 20-1 測定点 a(左中央部)測定データ

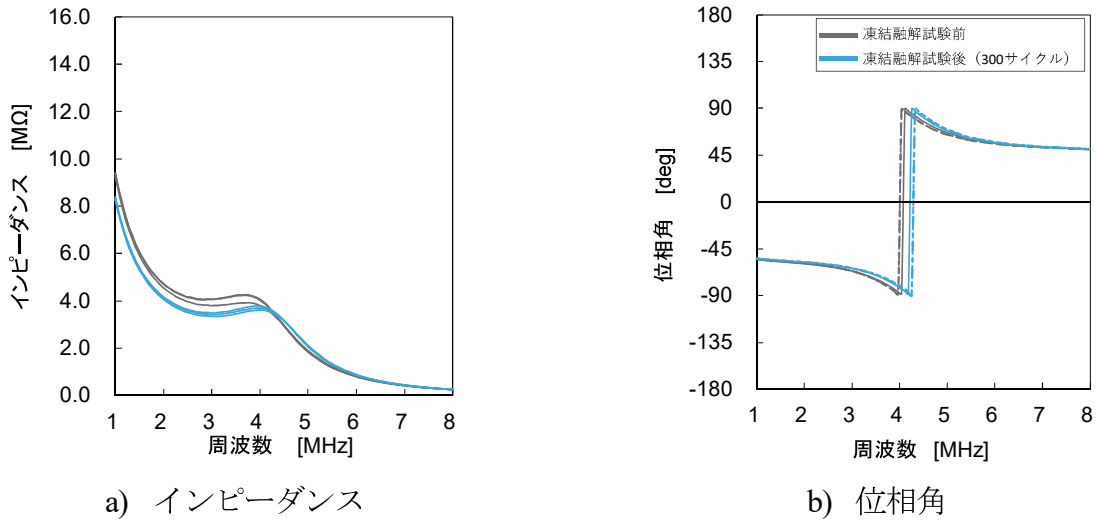


付図 20-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

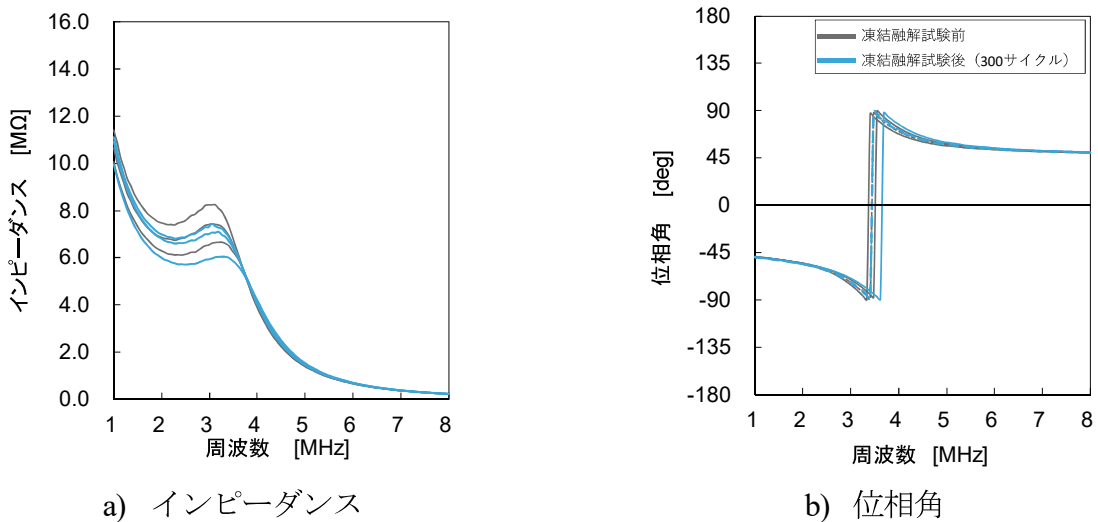


付図 20-3 測定点 c(右中央部)測定データ

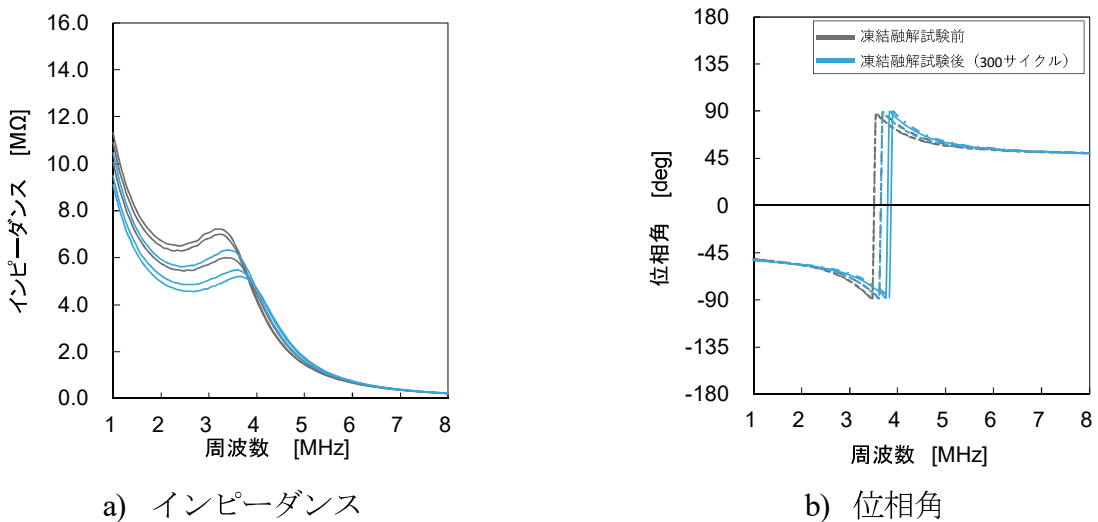
付.21 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F300-1 凍結融解サイクル300回 B-B'面測定



付図 21-1 測定点 a(左中央部)測定データ

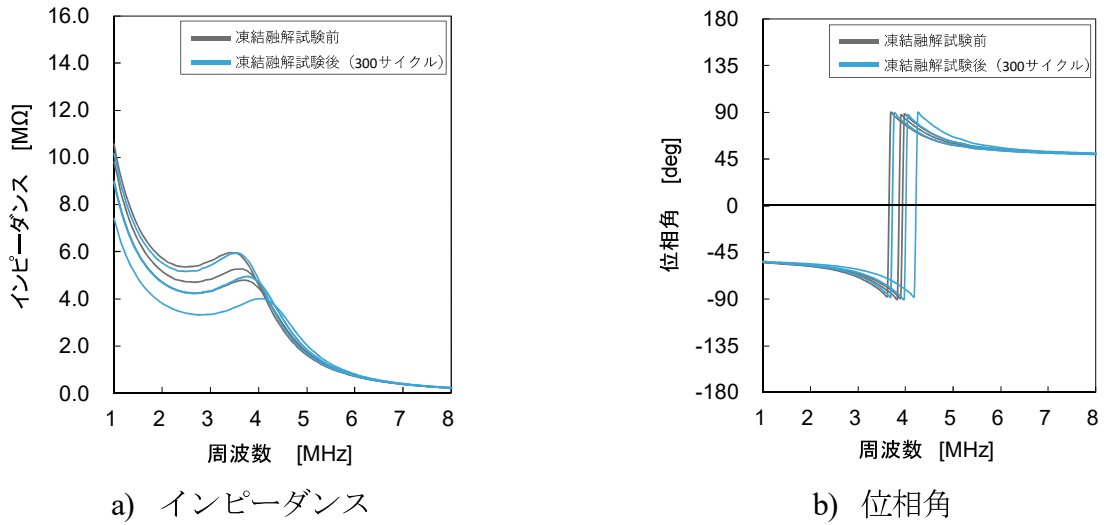


付図 21-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

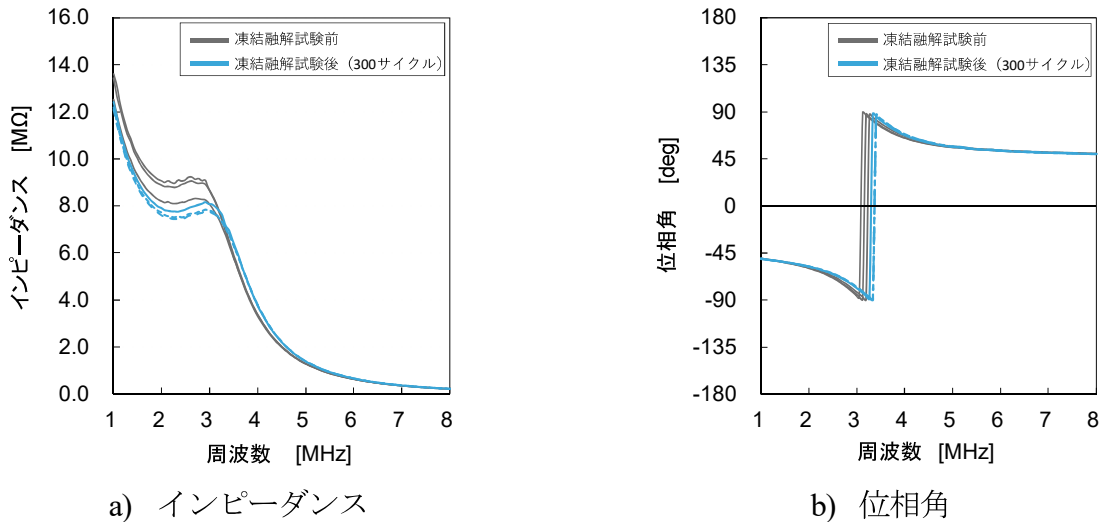


付図 21-3 測定点 c(右中央部)測定データ

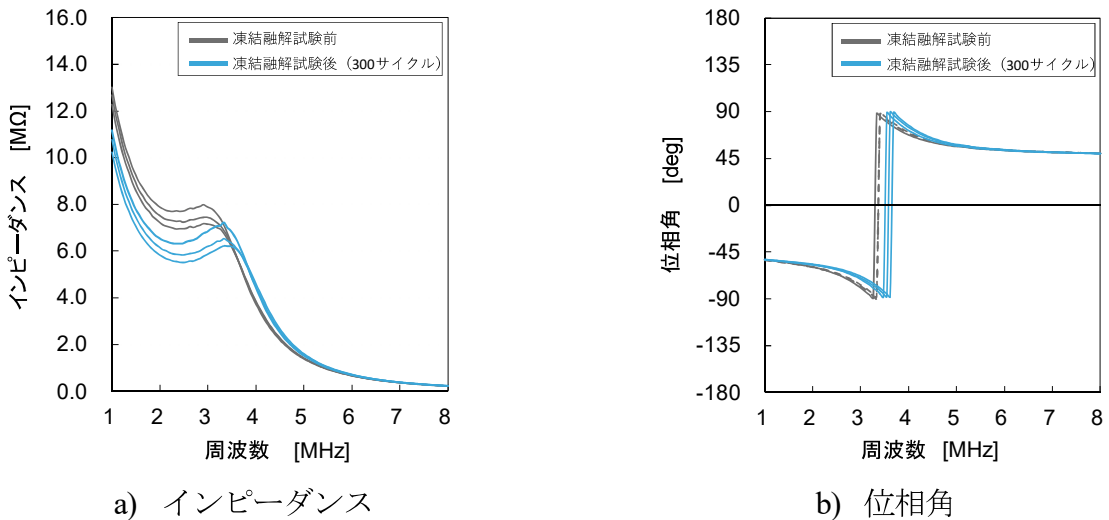
付.22 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F300-2 凍結融解サイクル300回 A-A'面測定



付図 22-1 測定点 a(左中央部)測定データ

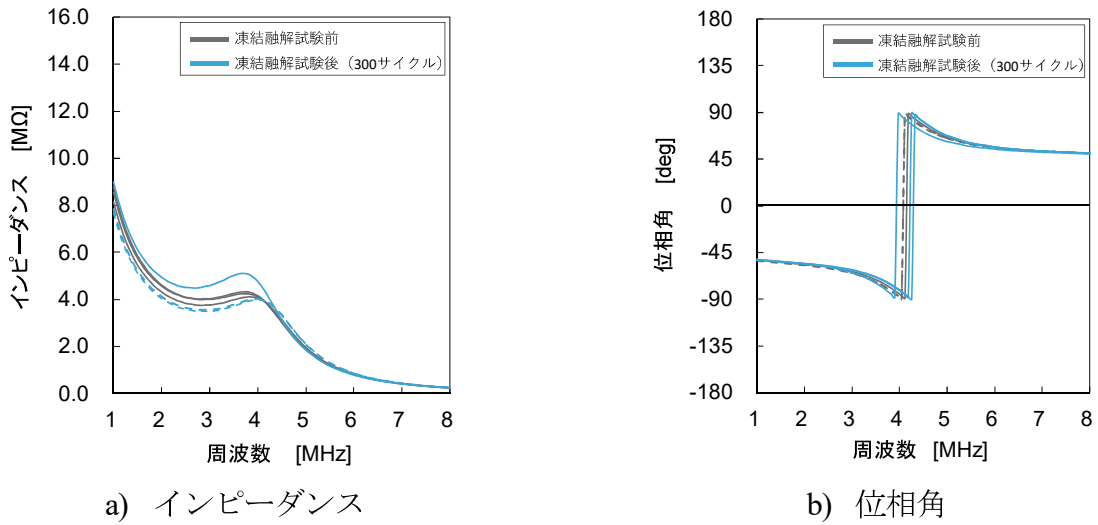


付図 22-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

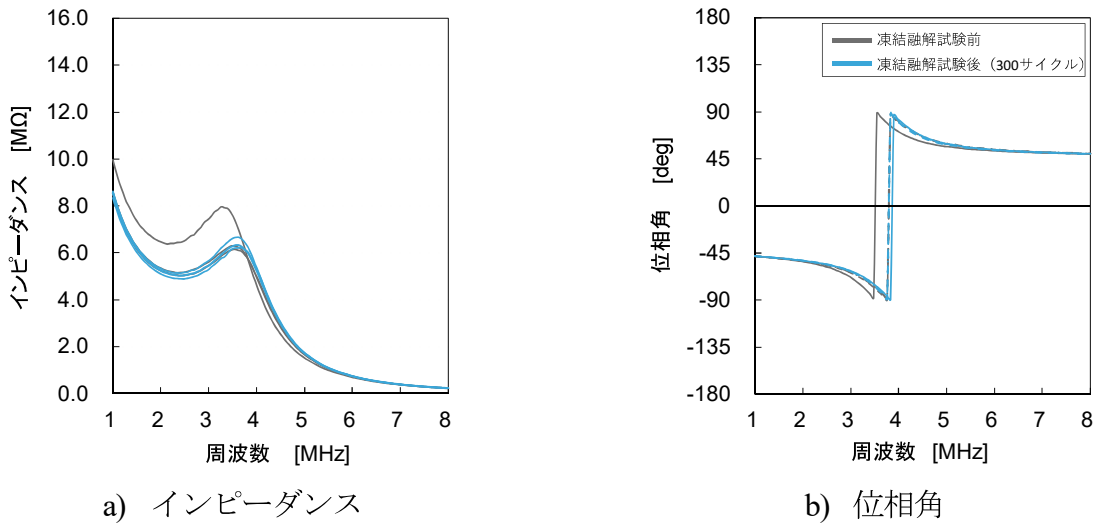


付図 22-3 測定点 c(右中央部)測定データ

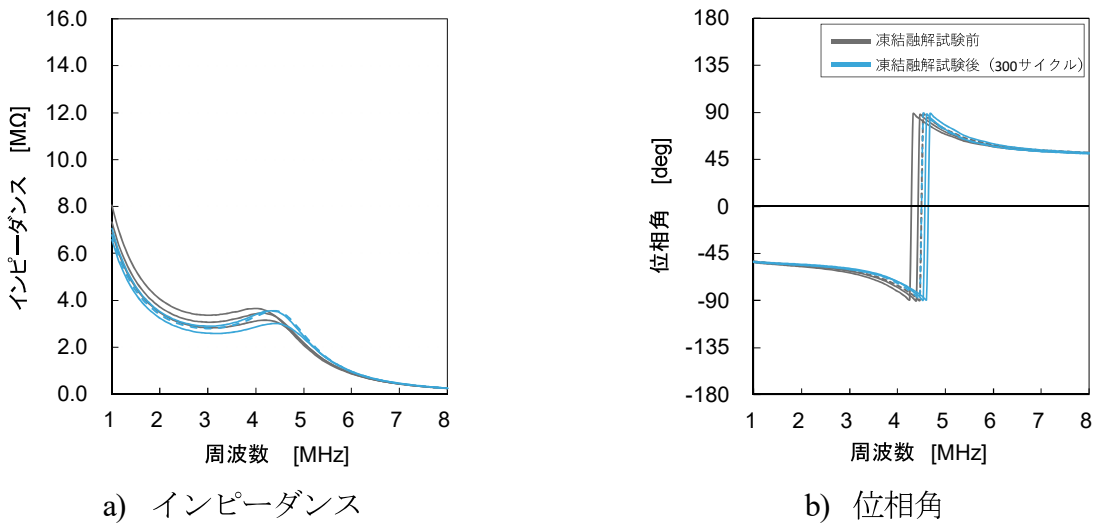
付.23 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F300-2 凍結融解サイクル300回 B-B'面測定



付図 23-1 測定点 a(左中央部)測定データ

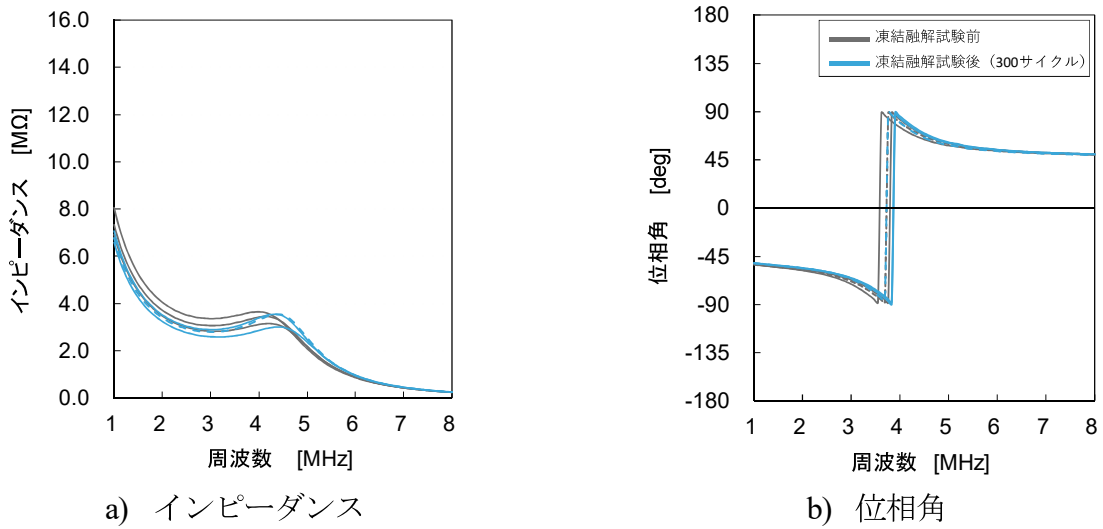


付図 23-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

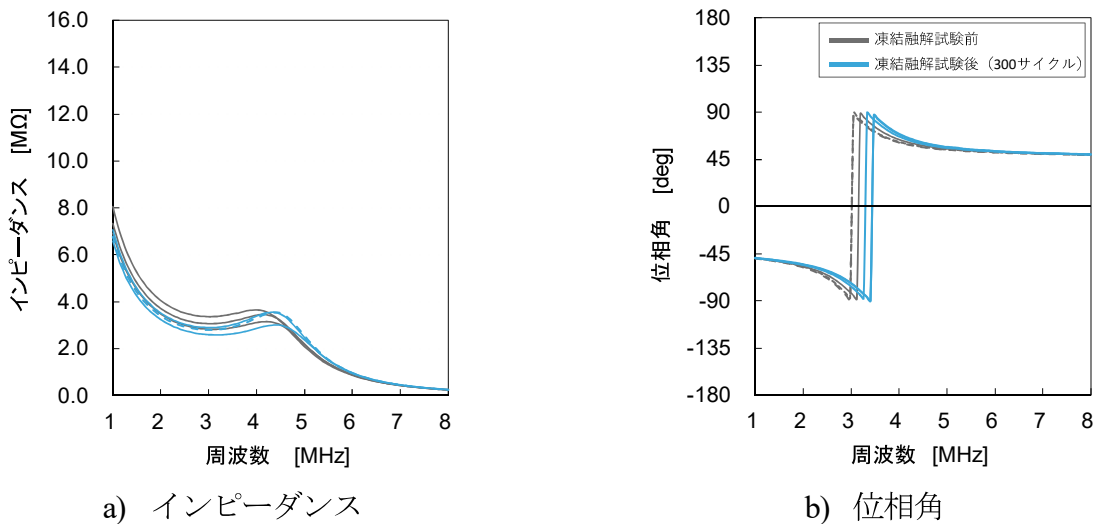


付図 23-3 測定点 c(右中央部)測定データ

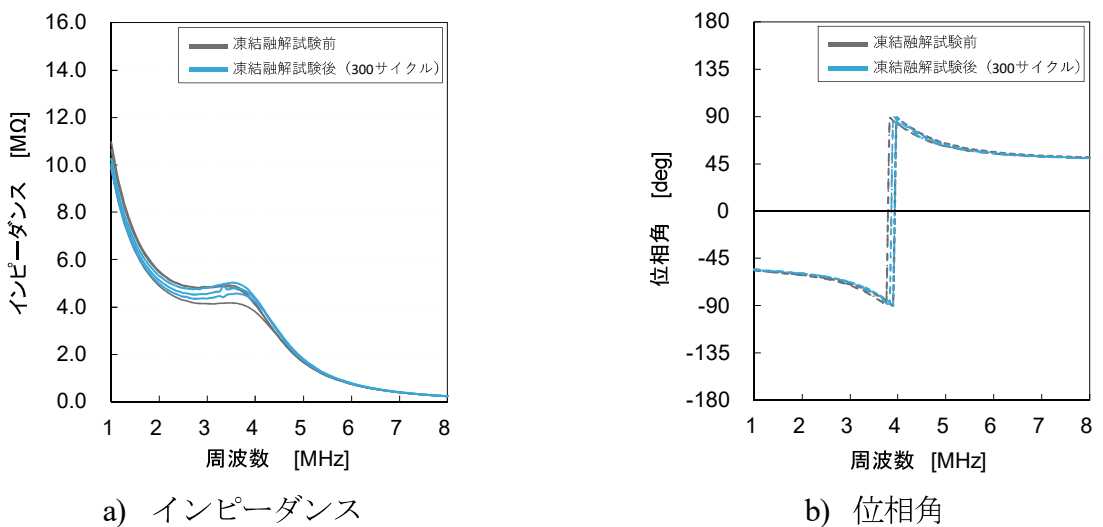
付.24 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F300-3 凍結融解サイクル300回 A-A'面測定



付図 24-1 測定点 a(左中央部)測定データ

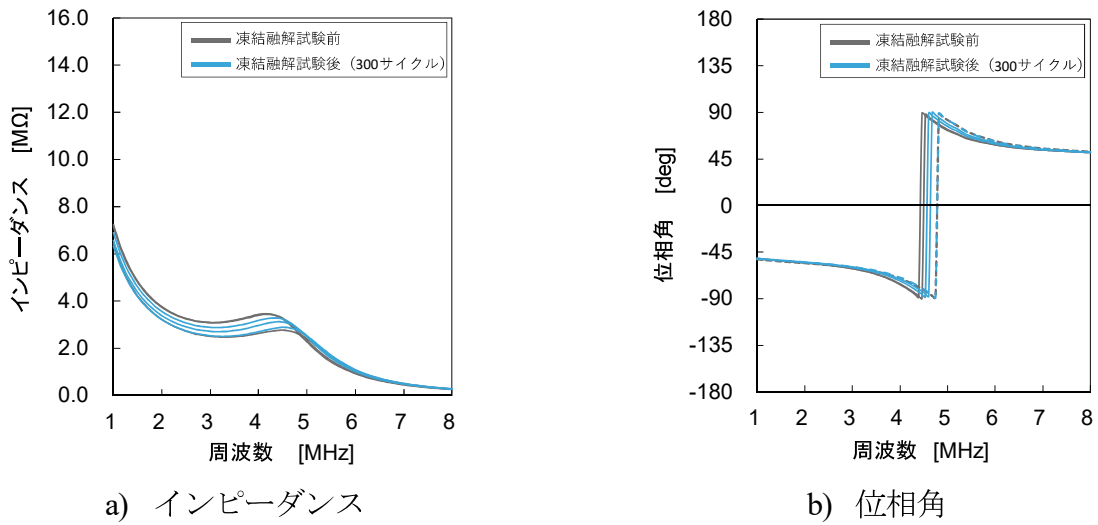


付図 24-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

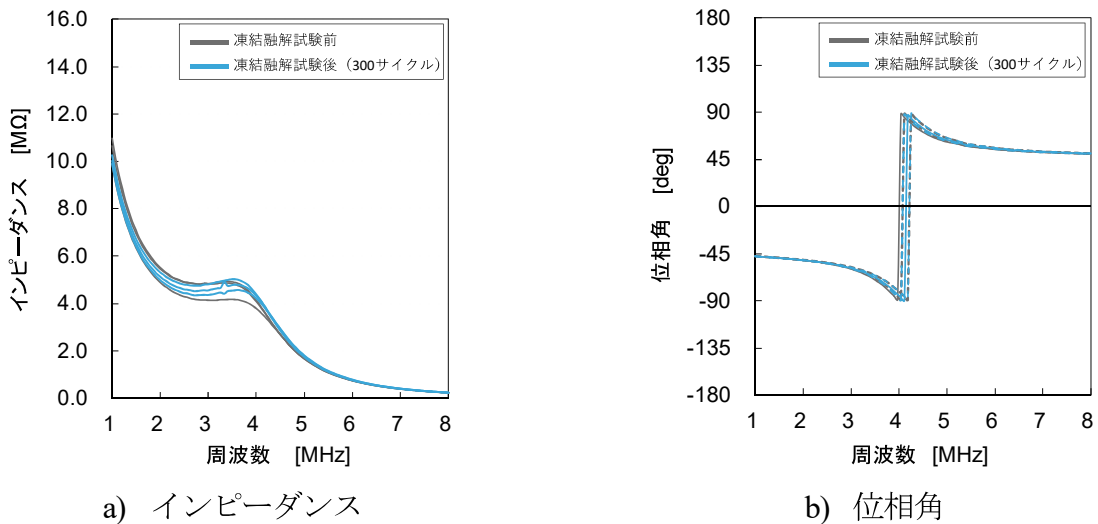


付図 24-3 測定点 c(右中央部)測定データ

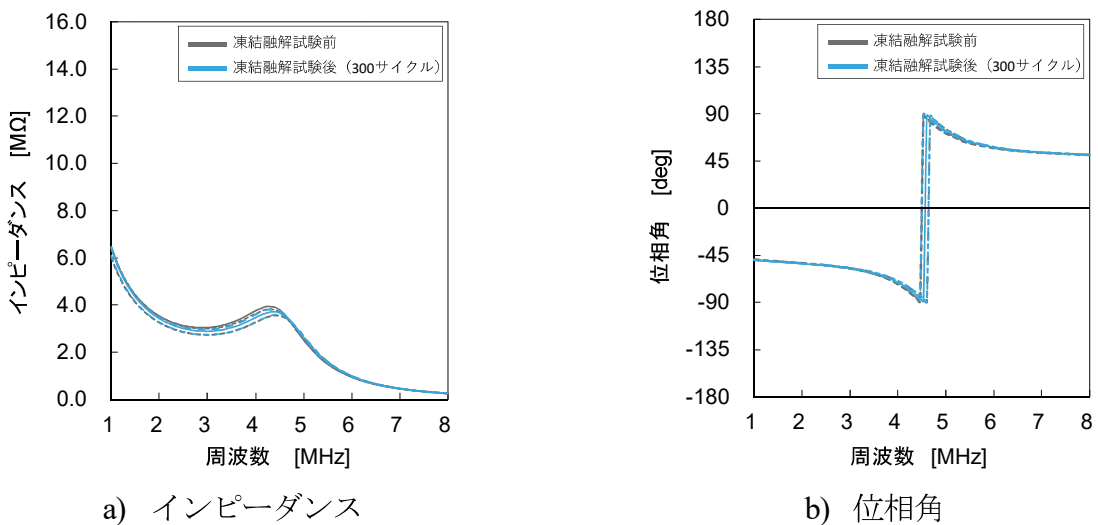
付.25 4面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F300-3 凍結融解サイクル300回 B-B'面測定



付図 25-1 測定点 a(左中央部)測定データ

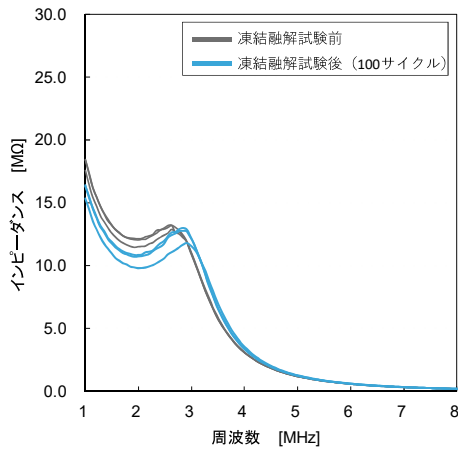


付図 25-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ

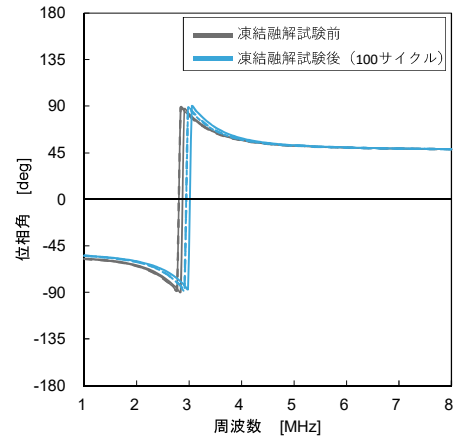


付図 25-3 測定点 c(右中央部)測定データ

付.26 2面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F100-4 凍結融解サイクル100回 A-A'面測定

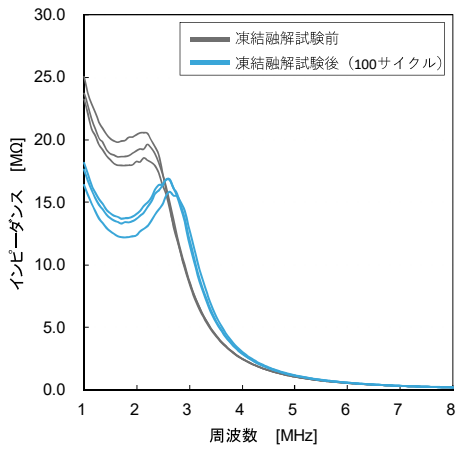


a) インピーダンス

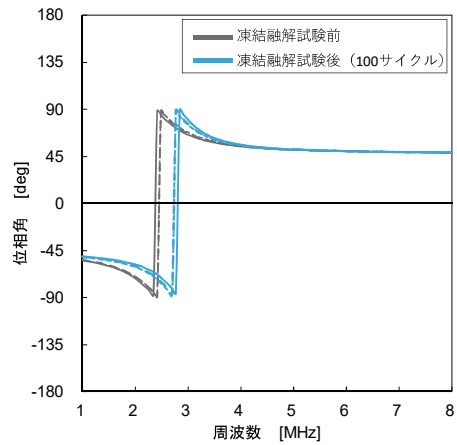


b) 位相角

付図 26-1 測定点 a(左中央部)測定データ

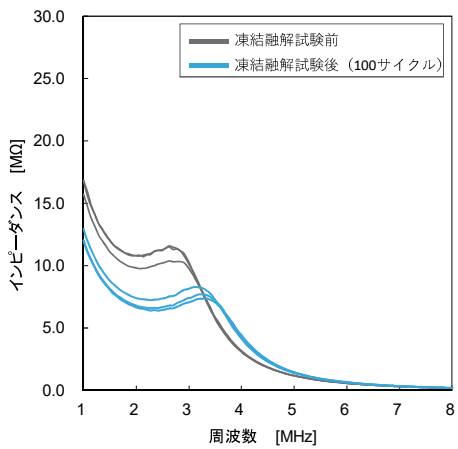


a) インピーダンス

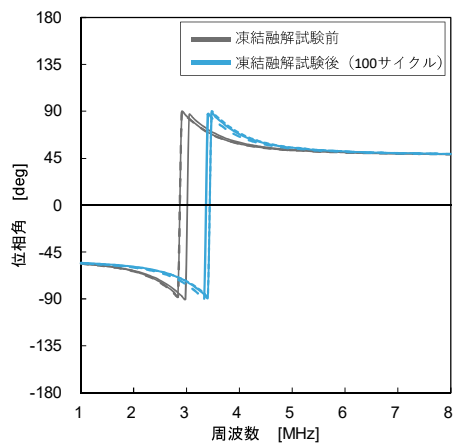


b) 位相角

付図 26-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ



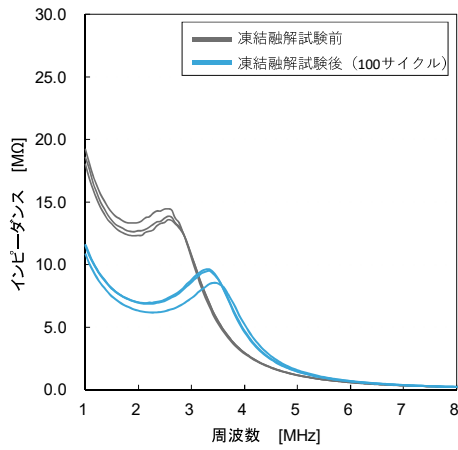
a) インピーダンス



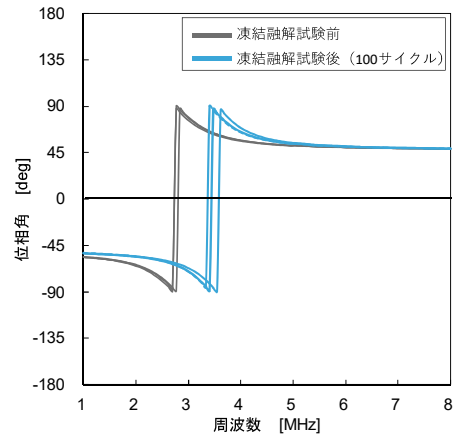
b) 位相角

付図 26-3 測定点 c(右中央部)測定データ

付.27 2面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F100-5 凍結融解サイクル100回 A-A'面測定

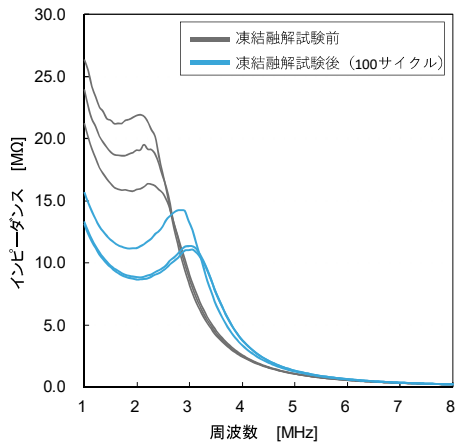


a) インピーダンス

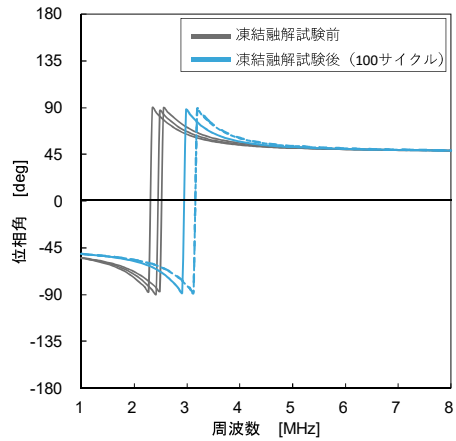


b) 位相角

付図 27-1 測定点 a(左中央部)測定データ

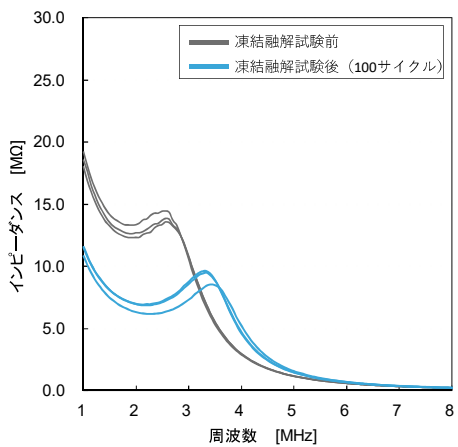


a) インピーダンス

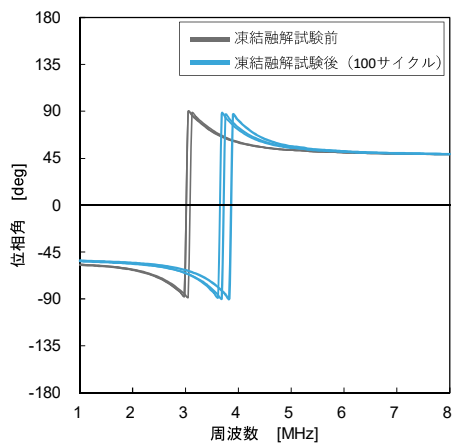


b) 位相角

付図 27-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ



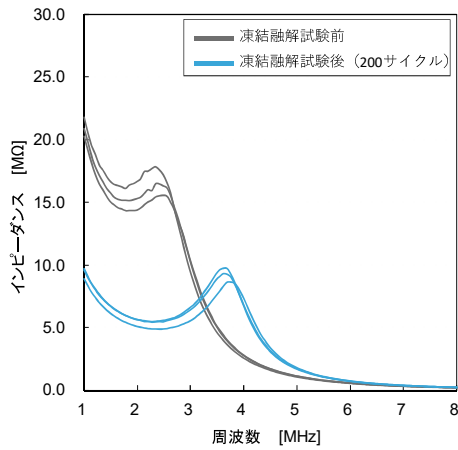
a) インピーダンス



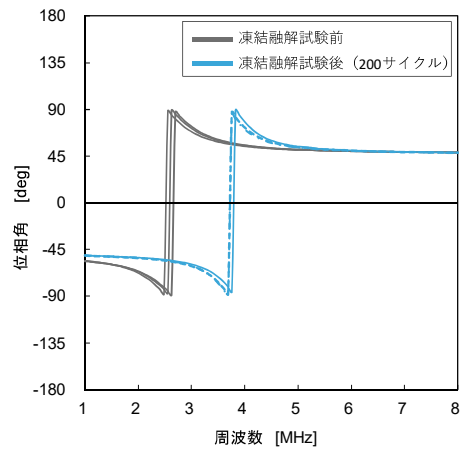
b) 位相角

付図 27-3 測定点 c(右中央部)測定データ

付.28 2面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F200-4 凍結融解サイクル200回 A-A'面測定

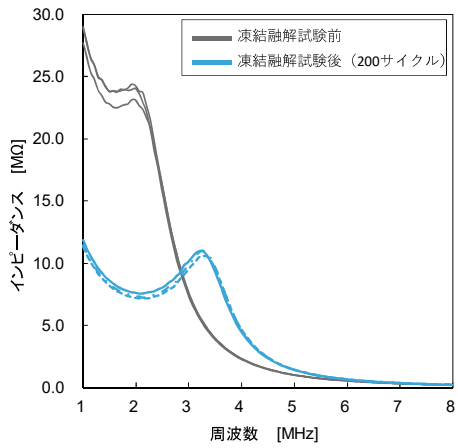


a) インピーダンス

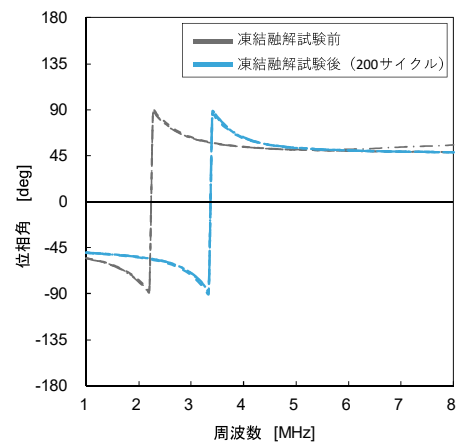


b) 位相角

付図 28-1 測定点 a(左中央部)測定データ

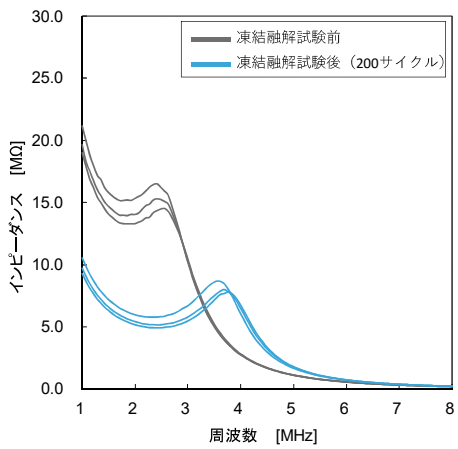


a) インピーダンス

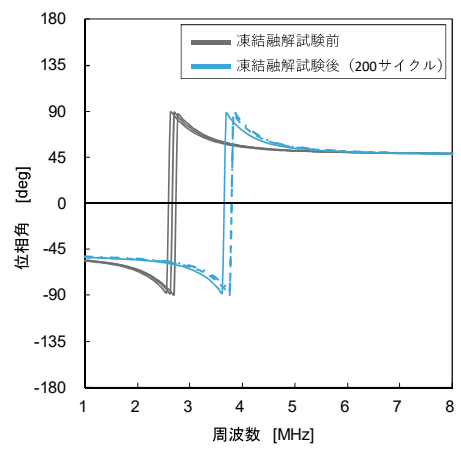


b) 位相角

付図 28-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ



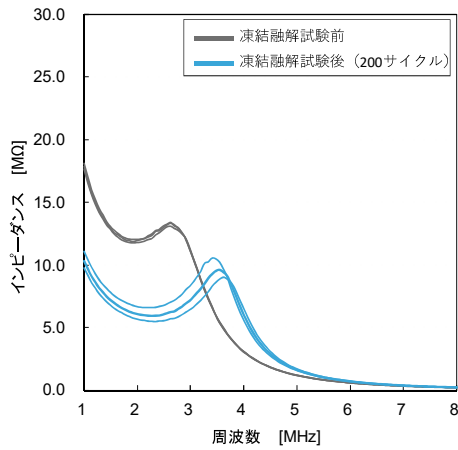
a) インピーダンス



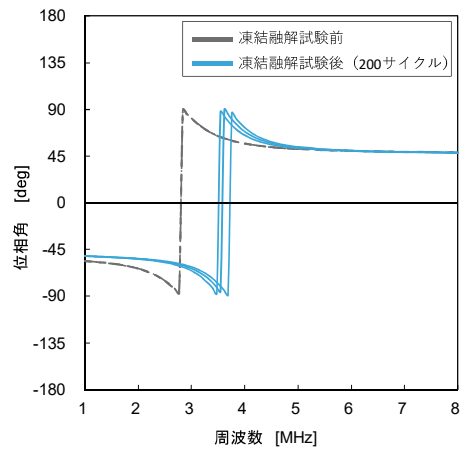
b) 位相角

付図 28-3 測定点 c(右中央部)測定データ

付.29 2面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F200-5 凍結融解サイクル200回 A-A'面測定

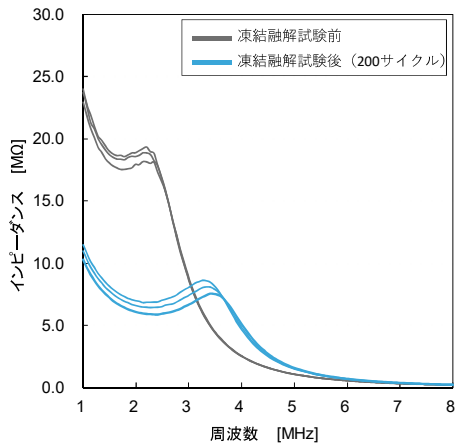


a) インピーダンス

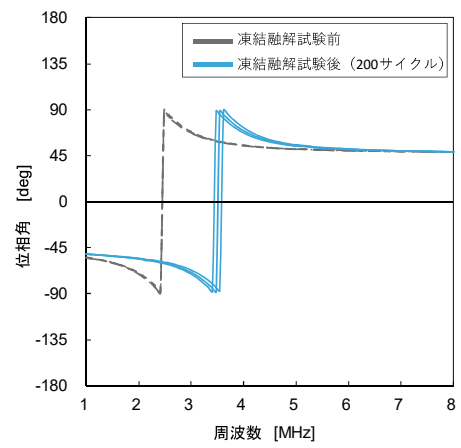


b) 位相角

付図 29-1 測定点 a(左中央部)測定データ

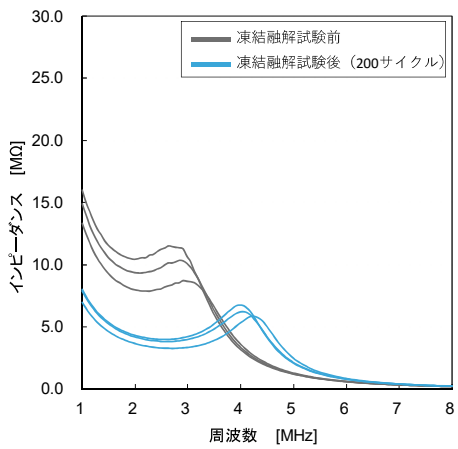


a) インピーダンス

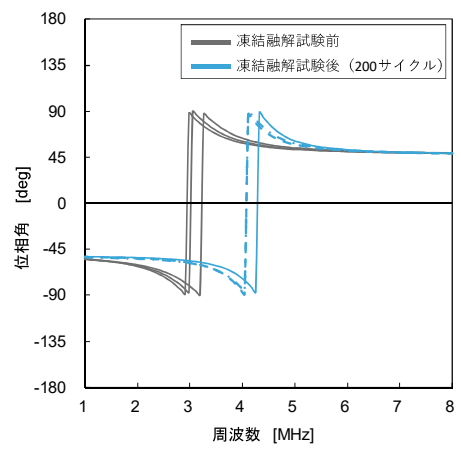


b) 位相角

付図 29-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ



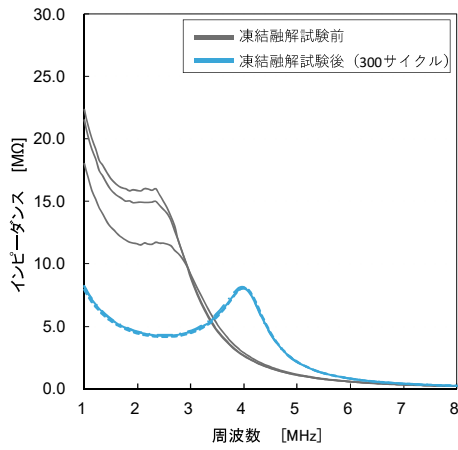
a) インピーダンス



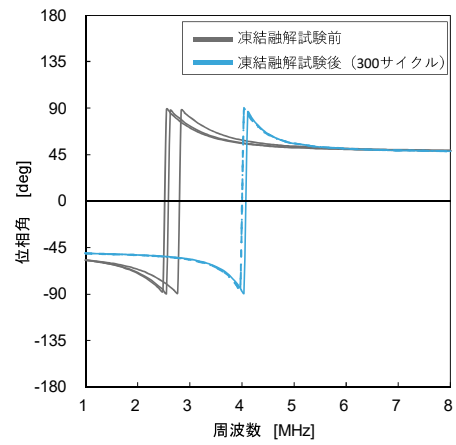
b) 位相角

付図 29-3 測定点 c(右中央部)測定データ

付.30 2面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F300-4 凍結融解サイクル300回 A-A'面測定

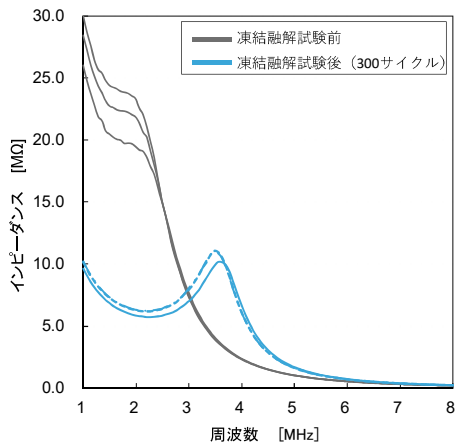


a) インピーダンス

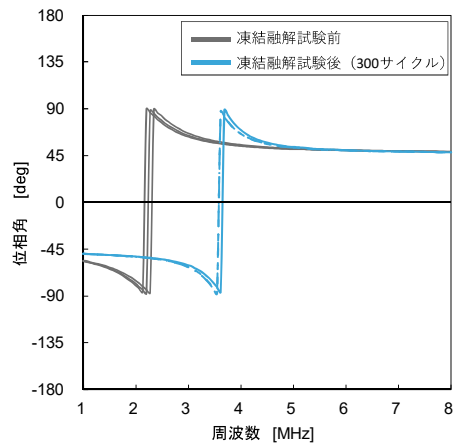


b) 位相角

付図 30-1 測定点 a(左中央部)測定データ

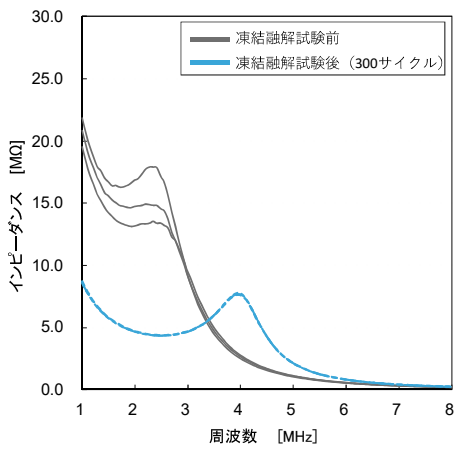


a) インピーダンス

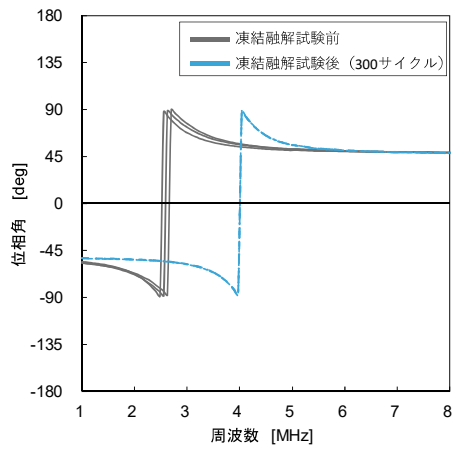


b) 位相角

付図 30-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ



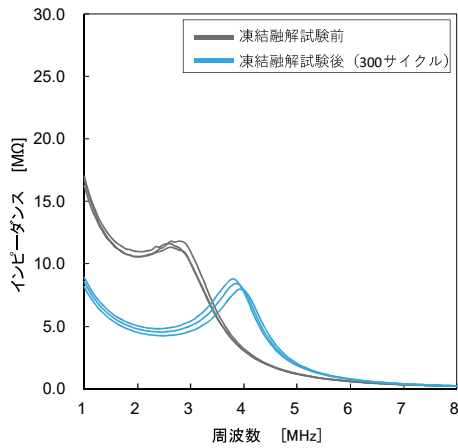
a) インピーダンス



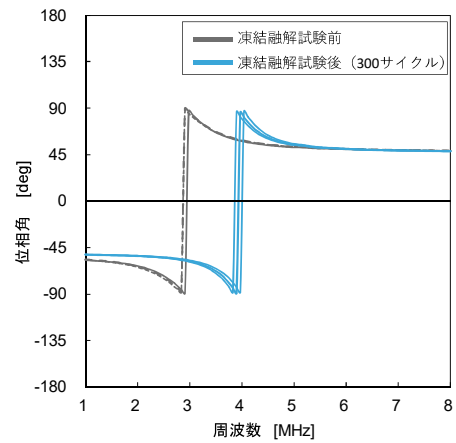
b) 位相角

付図 30-3 測定点 c(右中央部)測定データ

付.31 2面CFRP被覆コンクリート試験体 TP-F300-5 凍結融解サイクル300回 A-A'面測定

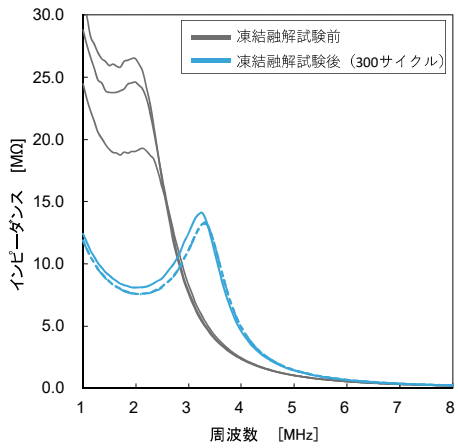


a) インピーダンス

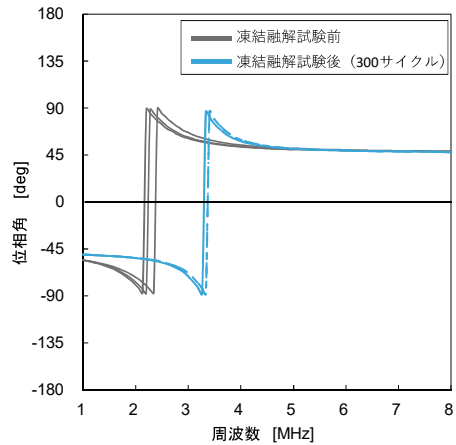


b) 位相角

付図 31-1 測定点 a(左中央部)測定データ

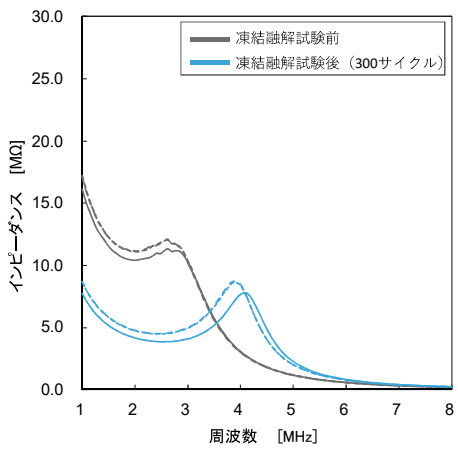


a) インピーダンス

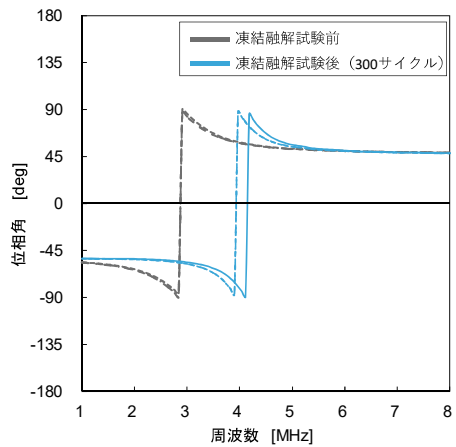


b) 位相角

付図 31-2 測定点 b(試験体中央部)測定データ



a) インピーダンス



b) 位相角

付図 31-3 測定点 c(右中央部)測定データ

謝 辞

本論文は、筆者が株式会社ジャストに在籍しながら、社会人学生として山口大学大学院創成科学研究科博士後期課程に在籍し2019年4月から2022年3月までの3年間に行った研究成果を取りまとめたものです。

本論文の主査を務めて頂きました山口大学大学院創成科学研究科教授 吉武 勇先生には、入学前の準備から、研究の方向性、実験の進め方、論文作成、査読結果への対応に至るまで、多岐にわたり懇切丁寧にご指導頂きました。また、積極的に海外へ論文投稿を行った方がよいとのご指導もあって2回（ホノルル、モントリオール）の国際会議への出席（モントリオールでの国際会議はCOVID-19の世界的蔓延によりVirtual Conferenceとなった）する機会を与えて頂き無事発表できたことは、この英語が拙い筆者に対して休日・夜中までご指導頂けたからであります。さらに、本論文の予備審査申請前に挫折しかけた筆者に適切なご助言を頂き、なんとか今こうして謝辞を記するまでに至ったことはひとえに、ご多幸中にも関わらず親身にご指導頂きご鞭撻を賜ったからこそであり、深謝申し上げます。

山口大学大学院創成科学研究科教授 麻生稔彦先生、同教授 河村 圭先生、同准教授 中島伸一郎先生、同准教授 渡邊学歩先生には、お忙しい中本論文の副査をお引き受け頂きましたこと、心より感謝申し上げます。予備審査ならびに本審査と2度にわたり様々な視点からの貴重なご意見とご助言を頂戴し、本研究の成果をより高い次元にまで高めることができました。ここに御礼申し上げます。

三菱ケミカルインフラテック株式会社 長谷川泰聰博士、齋藤信人氏には、本研究で使用するCFRPシートとAFRPシートをご提供頂くとともに、その施工指導も行って頂きました。厚く御礼申し上げます。

株式会社アシスの村上雄一郎氏には、ひび割れを模したスリットを入れた試験体を製作するにあたり、スリットを引き抜く工夫においてご支援とご助言を賜りました。また、凍結融解試験の試験体製作にもご協力頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

凍結融解試験では、一般財団法人建材試験センター西日本試験所の杉原 大祐氏にお忙しい中ご協力頂き感謝申し上げます。

株式会社太平洋コンサルタントの青山一真氏、藤田英樹氏には、凍結融解試験体の内部劣化損傷状態を確認するためのX線CT撮影を実施して頂きました。厳しい納期にも関わらず快くお受けして頂き、厚く御礼申し上げます。

筆者が山口大学大学院在学中に所属していた施設材料科学研究室の卒業生、在学生の皆様からは、研究発表などの意見交換の場を通じて貴重なご意見やご指摘を頂戴しました。特に当時博士後期課程3年生であった、福島邦治博士（現 日本ピーエス株式会社）、長谷川泰聰博士（前記）、三原孝文博士（現 極東興和株式会社）には本研究を進めるにあたり要所要所において研究心を鼓舞して頂きました。そして、時を同じく博士後期課程に入学し学位論文に取り組んだ、宇部興

謝 辞

産株式会社の玉滝浩司氏とはお互いに励まし合うことで、ピア効果をプラスに保ちつつお互いの研究を進めていくことができました。本研究に着手してこの3年間で様々な方々にご縁を繋ぐことができたこと、心より感謝申し上げます。

筆者が在籍する株式会社ジャストの武田悠治氏には、研究当初から補佐となりあらゆる実験をサポートして頂き感謝致します。また、事務的な面で専務取締役 角田 誠氏、管理部の高木久代氏には筆者に学位取得の機会を与えて頂き、多岐にわたるサポートを賜りました。また、本研究を進めるにあたり、ご支援、ご協力を頂きながらここに名前を記することができなかった株式会社ジャストの全社員に対して深い敬意と感謝を示し、御礼申し上げます。

株式会社地盤総合研究所の宮坂享明博士（山口大学客員教授）、山口大学大学院創成科学研究科名誉教授 兵動正幸先生には、吉武 勇先生とのご縁を頂き、本研究を着手するきっかけを頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

最後になりますが、五十路となつてからの博士課程入学を快く承諾し、3年間休日も返上して本研究、論文執筆を行うことがほとんどであった筆者を家庭面から応援してくれた素晴らしい妻に心からの感謝を記し、謝辞と致します。

2022年3月
冨田 健次