JAEA-Review
2025-004
DOI:10.11484/jaea-review-2025-004

建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究（委託研究）

－令和５年度　英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－

Development of a Hybrid Method for Evaluating the Long-term Structural Soundness of Nuclear Reactor Buildings Using Response Monitoring and Damage Imaging Technologies (Contract Research)

– FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project –

福島廃炉安全工学研究所　廃炉環境国際共同研究センター
東北大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Tohoku University

July 2025

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　研究開発推進部　科学技術情報課
〒 319-1112　茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2025

建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用した
ハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究
（委託研究）
－令和５年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－

日本原子力研究開発機構　福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター

東北大学

（2025 年 1 月 31 日受理）

日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）では、令和５年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業（以下、「本事業」という。）を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等をはじめとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。

平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、令和３年度に採択された研究課題のうち、「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」の令和 3 年度から令和５年度分の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、高放射線量率と高汚染のため、現場への接近性が極端に限られるような事故を経験した原子炉建屋の長期構造健全性の見通しを得るために必要な評価手法を開発しようとするものである。

3 ヵ年計画の最終年度目である令和 5 年度は、令和 4 年度までの成果を踏まえ、本研究の最終的な成果をまとめることを目的として、(1)地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発、(2)電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発、(3)損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発、(4)総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案、(5)研究推進の研究項目について試験、解析や活動を行い、3 ヵ年計画の所期の目標を達成した。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、東北大学が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

JAEA-Review 2025-004

Development of a Hybrid Method for Evaluating the Long-term Structural Soundness of Nuclear Reactor Buildings Using Response Monitoring and Damage Imaging Technologies
(Contract Research)
－ FY2023 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project －

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research and Engineering Institute
Japan Atomic Energy Agency
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

Tohoku University

(Received January 31, 2025)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to "the Project") in FY2023.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields.

The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2021, this report summarizes the research results of the "Development of a hybrid method for evaluating the long-term structural soundness of nuclear reactor buildings using response monitoring and damage imaging technologies" conducted from FY2021 to FY2023.

The present study aims to develop an evaluation method necessary to obtain a perspective on the long-term structural soundness of accident-damaged reactor buildings, where accessibility to work sites is extremely limited due to high radiation dose rate and high contamination.

In FY2023, the final year of the three-year project, experimental and analytical research activities were performed to develop, (1) Method for evaluating the building by monitoring the response to earthquakes and other disturbances, (2) Damage detection technology for concrete structures using electromagnetic waves, (3) Evaluation method for concrete materials and structures based on damage detection information, (4) Comprehensive soundness evaluation method and a long-term maintenance plan, (5) Promotion of the research. Expected results and final goals are achieved based on the outcomes including achievements up to FY2022.

Keywords: Concrete Structure, Long-term Soundness, Degradation, Soundness Evaluation, Non-destructive Inspection & Monitoring, Acceleration & Gyro Sensor, Tera Hertz Wave, Maintenance Plan

This work was performed by Tohoku University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要 1
2. 平成 30 年度 採択課題 2
3. 令和元年度 採択課題 5
4. 令和 2 年度 採択課題 8
5. 令和 3 年度 採択課題 10
6. 令和 4 年度 採択課題 12
7. 令和 5 年度 採択課題 14

付録　成果報告書 17

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project 1
2. Accepted Proposal in FY2018 2
3. Accepted Proposal in FY2019 5
4. Accepted Proposal in FY2020 8
5. Accepted Proposal in FY2021 10
6. Accepted Proposal in FY2022 12
7. Accepted Proposal in FY2023 14

Appendix Result Report 17

This is a blank page.

1.　英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン（平成 26 年 6 月文部科学省）」等を踏まえ、平成 27 年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」（以下、「本事業」という。）を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）では、平成 27 年に廃炉国際共同研究センター（以下、「CLADS」という。現：廃炉環境国際共同研究センター）を組織し、「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所廃炉（以下、「1F 廃炉」という。）に係る研究開発を進めている。

また、平成 29 年 4 月に CLADS の中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏まえ、今後は CLADS を中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指すことが期待されている。

このため、本事業では平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、①共通基盤型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、④研究人材育成型廃炉研究プログラム（令和元年度より新設）に再編した。

2.　平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム	11 課題（若手研究 6 課題、一般研究 5 課題）
課題解決型廃炉研究プログラム	6 課題
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英）

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	山﨑 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邉 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー加速器研究機構

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

3.　令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム　7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）
課題解決型廃炉研究プログラム　4 課題
国際協力型廃炉研究プログラム　4 課題（日英 2 課題、日露 2 課題）
研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (～R2.3.31) 大曲 新矢 (R2.4.1～)	産業技術総合研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邉 大輔	日立ＧＥニュークリア・エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二 (～R3.6.30) 塚原 剛彦 (R3.7.1～)	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (～R3.3.31) 岡山大学 (R3.4.1～)

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食･変質に関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾大学

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	淺間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティックスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (～R2.3.31) 竹下 健二 (～R3.6.30) 塚原 剛彦 (R3.7.1～)	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

4.　令和 2 年度 採択課題

令和 2 年度は、2 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和 2 年 3 月 17 日～令和 2 年 5 月 14 日（課題解決型）
　　令和 2 年 5 月 13 日～令和 2 年 7 月 15 日（国際協力型）

課題数：10 課題
　課題解決型廃炉研究プログラム　　8 課題（若手研究 2 課題、一般研究 6 課題）
　国際協力型廃炉研究プログラム　　2 課題（日英）

令和 2 年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム
【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍 （～R4.7.31） 村上 健太 （R4.8.1～）	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー加速器研究機構
α／β／γ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現:ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邉 豊	東北大学
β、γ、X 線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技術の開拓	浅尾 直樹	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン技術の研究開発	鎌田 創	海上・港湾・航空技術研究所

5.　令和 3 年度 採択課題

令和 3 年度は、2 つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和 3 年 3 月 16 日～令和 3 年 5 月 17 日（課題解決型）
令和 3 年 4 月 13 日～令和 3 年 7 月 1 日（国際協力型 日英共同研究）
令和 3 年 7 月 12 日～令和 3 年 8 月 18 日（国際協力型 日露共同研究）

課題数：12 課題
課題解決型廃炉研究プログラム　　8 課題
国際協力型廃炉研究プログラム　　2 課題（日英）、2 課題（日露）

令和 3 年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学
燃料デブリ周辺物質の分析結果に基づく模擬デブリの合成による実機デブリ形成メカニズムの解明と事故進展解析結果の検証によるデブリ特性データーベースの高度化	宇埜 正美	福井大学
ジオポリマー等による PCV 下部の止水･補修及び安定化に関する研究	鈴木 俊一	東京大学
世界初の同位体分析装置による少量燃料デブリの性状把握分析手法の確立	坂本 哲夫	工学院大学
アルファ微粒子の実測に向けた単一微粒子質量分析法の高度化	豊嶋 厚史	大阪大学
連携計測による線源探査ロボットシステムの開発研究	人見 啓太朗	東北大学
中赤外レーザー分光によるトリチウム水連続モニタリング手法の開発	安原 亮	自然科学研究機構

課題名	研究代表者	所属機関
福島原子力発電所事故由来の難固定核種の新規ハイブリッド固化への挑戦と合理的な処分概念の構築・安全評価	中瀬 正彦	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一原子力発電所の廃止措置における放射性エアロゾル制御及び除染に関する研究	Erkan Nejdet （～R4.1.31） 三輪 修一郎 （R4.2.1～）	東京大学
燃料デブリ取り出しのための機械式マニピュレータのナビゲーションおよび制御	淺間 一	東京大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
福島第一発電所 2、3 号機の事故進展シナリオに基づく FP・デブリ挙動の不確かさ低減と炉内汚染状況・デブリ性状の把握	小林 能直	東京工業大学
非接触測定法を用いた燃料デブリ臨界解析技術の高度化	小原 徹	東京工業大学

6.　令和４年度 採択課題

令和４年度は、２つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和４年３月１日～令和４年５月６日（課題解決型）
　　令和４年４月７日～令和４年６月 16 日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：８課題
課題解決型廃炉研究プログラム　６課題
国際協力型廃炉研究プログラム　２課題（日英）

令和４年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
革新的アルファダスト撮像装置と高線量率場モニタの実用化とその応用	黒澤 俊介	東北大学
3 次元線量拡散予測法の確立と γ 線透過率差を利用した構造体内調査法の開発	谷森 達	京都大学
α汚染可視化ハンドフットクロスモニタの要素技術開発	樋口 幹雄	北海道大学
高放射線耐性の低照度用太陽電池を利用した放射線場マッピング観測システム開発	奥野 泰希	京都大学 （～R5.3.31） 理化学研究所 （R5.4.1～）
障害物等による劣悪環境下でも通信可能なパッシブ無線通信方式の開発	新井 宏之	横浜国立大学
無線 UWB とカメラ画像分析を組合せたリアルタイム 3D 位置測位・組込システムの開発・評価	松下 光次郎	岐阜大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
耐放射線プロセッサを用いた組み込みシステムの開発	渡邊 実	岡山大学
マイクロ・ナノテクノロジーを利用したアルファ微粒子の溶解・凝集分散に及ぼすナノ界面現象の探求	塚原 剛彦	東京工業大学

7.　令和５年度 採択課題

令和５年度は、２つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和５年３月１日～令和５年４月 14 日（課題解決型）
　　令和５年４月 12 日～令和５年６月 15 日（国際協力型 日英共同研究）

課題数：9 課題
課題解決型廃炉研究プログラム　7 課題
国際協力型廃炉研究プログラム　2 課題（日英）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。
その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議及びステアリングコミッティでの審議を経て、採択課題を決定した。

令和５年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な耐放射線性ダイヤモンド中性子計測システムのプロトタイプ開発	金子 純一	北海道大学
簡易非破壊測定に向けた革新的な n･γ シンチレーション検出システムの開発	鎌田 圭	東北大学
ペデスタル部鉄筋コンクリート損傷挙動の把握に向けた構成材料の物理･化学的変質に関する研究	五十嵐 豪	名古屋大学
動画像からの特徴量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリング	中村 啓太	札幌大学
放射性コンクリート廃棄物の減容を考慮した合理的処理・処分方法の検討	小崎 完	北海道大学

課題名	研究代表者	所属機関
高バックグラウンド放射線環境における配管内探査技術の開発	鳥居 建男	福井大学
PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発	椎名 達雄	千葉大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的分光画像解析による燃料デブリの可視化への挑戦と LIBS による検証	牟田 浩明	大阪大学
燃料デブリ除去に向けた様々な特性をもつメタカオリンベースのジオポリマーの設計と特性評価	Yogarajah Elakneswaran	北海道大学

本報告書は、以下の課題の令和 3 年度から令和 5 年度分の研究成果について取りまとめたものである。

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究	前田 匡樹	東北大学

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録

成果報告書

This is a blank page.

令和５年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究

（契約番号　R05I042）

成果報告書

令和６年３月

国立大学法人東北大学

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、国立大学法人東北大学が実施した「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」の令和５年度分の研究成果を取りまとめたものである。

目次

概略 ····· xi

1. はじめに ····· 1-1

2. 業務計画 ····· 2-1
2.1 全体計画 ····· 2-1
2.2 実施体制 ····· 2-3
2.3 令和5年度の成果の目標及び業務の実施方法 ····· 2-4
2.3.1 実施内容 ····· 2-4
2.3.2 令和5年度の研究スケジュール ····· 2-6

3. 実施内容及び成果 ····· 3-1
3.1 地震時の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発
【令和3年度～令和5年度】 ····· 3-1
3.1.1 動的応答・振動性状の観測及び評価【令和3年度～令和5年度】 ····· 3-1
3.1.2 長期変形性状の観測及び評価（再委託先：東京工業大学）
【令和3年度～令和5年度】 ····· 3-16
3.2 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発
【令和3年度～令和5年度】 ····· 3-35
3.2.1 テラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：芝浦工業大学）
【令和3年度～令和5年度】 ····· 3-35
3.2.2 サブテラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：木更津高専）
【令和3年度～令和5年度】 ····· 3-47
3.2.3 中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証
（連携先：原子力機構）【令和3年度～令和5年度】 ····· 3-55
3.3 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発
【令和3年度～令和5年度】 ····· 3-65
3.3.1 コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価【令和3年度～令和5年度】 3-65
3.3.2 鉄筋腐食と付着不良・剥離等に基づく材料特性の評価
（再委託先：日本工業大学）【令和3年度～令和5年度】 ····· 3-73
3.3.3 材料劣化特性に基づく部材の耐震性能評価（再委託先：大阪公立大学）
【令和4年度～令和5年度】 ····· 3-101
3.4 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案
【令和3年度～令和5年度】 ····· 3-118
3.5 研究推進 ····· 3-135

4. 結言 ····· 4-1

参考文献 ····· 5-1

執筆者リスト

研究代表者

国立大学法人東北大学	教授	前田 匡樹
	特任教授（客員）	青木 孝行
	特任教授	堂﨑 浩二
	准教授	西脇 智哉

再委託先

学校法人芝浦工業大学	教授	田邉 匡生
国立大学法人東京工業大学	准教授	西村 康志郎
学校法人日本工業大学	助教	田中 章夫
独立行政法人国立高等専門学校機構		
木更津工業高等専門学校	准教授	藤井 翔
公立大学法人大阪公立大学	准教授	鈴木 裕介

連携先

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	グループリーダー	上野 文義
	グループリーダー	菖蒲 敬久
	研究員	栗田 圭輔

表一覧

表 2.1-1	本研究の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法	·····	2-1
表 2.1-2	本研究のコンクリート構造物損傷検知技術	·····	2-1
表 2.1-3	本研究のコンクリート材料の経年劣化の推定法	·····	2-2
表 2.3-1	令和 5 年度研究スケジュール	·····	2-6
表 3.1.1-1	SDOF 試験体の特性	·····	3-2
表 3.1.1-2	SDOF 実験結果	·····	3-4
表 3.1.1-3	2DOF 試験体の特性	·····	3-7
表 3.1.1-4	2DOF 試験体各階ごとの柱の数	·····	3-7
表 3.1.1-5	計算と観測周期の比較	·····	3-8
表 3.1.1-6	周期の精度	·····	3-8
表 3.1.1-7	観測と予測剛性の比較	·····	3-9
表 3.1.1-8	推定した剛性分布の精度	·····	3-9
表 3.1.2-1	試験体 No.3 の正弦波加振と加振結果	·····	3-17
表 3.1.2-2	試験体 No.4 の地震波加振と加振結果	·····	3-18
表 3.2.1-1	コア抜きサンプルの内部に水平分布するひびのテラヘルツ反射率測定	·····	3-36
表 3.2.1-2	内部に亀裂が斜め方向に発生する試験片のテラヘルツ反射率測定	·····	3-36
表 3.2.1-3	サブテラヘルツ/テラヘルツによる非破壊診断対象と解析手法	·····	3-44
表 3.2.2-1	コンクリート内部の鉄筋腐食を検知する手法の比較	·····	3-52
表 3.3.1-1	調合表	·····	3-66
表 3.3.2-1	内部劣化の推定を目的とした測定対象の一覧	·····	3-75
表 3.3.2-2	含水率の推定を目的とした測定対象の一覧	·····	3-77
表 3.3.2-3	コンクリートの計画調合	·····	3-78
表 3.3.2-4	サブテラヘルツ波光学測定装置の構成	·····	3-79
表 3.3.2-5	測定条件の組み合わせの一覧	·····	3-80
表 3.3.2-6	適用性検証のための既存測定技術	·····	3-83
表 3.3.2-7	打音法による卓越周波数	·····	3-90
表 3.3.3-1	材料の損傷程度と材料構成則で設定する各特性の関係	·····	3-104
表 3.3.3-2	コンクリートの材料特性	·····	3-107
表 3.3.3-3	鉄筋の材料特性	·····	3-108
表 3.3.3-4	損傷程度「軽微」のコンクリートの材料特性	·····	3-109
表 3.3.3-5	損傷程度「小」のコンクリートの材料特性	·····	3-109
表 3.3.3-6	損傷程度「中」、「大」のコンクリートの材料特性	·····	3-109
表 3.3.3-7	損傷程度「軽微」での各点のひずみ、応力値	·····	3-110
表 3.3.3-8	損傷程度「小」での各点のひずみ、応力値	·····	3-110
表 3.3.3-9	損傷程度「中」、「大」での各点のひずみ、応力値	·····	3-110
表 3.3.3-10	残存耐力マトリクス	·····	3-116
表 3.3.3-11	残存剛性マトリクス（初期剛性）	·····	3-116
表 3.3.3-12	残存剛性マトリクス（2 次剛性）	·····	3-116

表 3.4-1　地震観測記録 ・・・・・・ 3-119
表 3.4-2　応答予測結果 ・・・・・・ 3-120
表 3.4-3　事故炉原子炉建屋の長期保全計画（1 例）の提案 ・・・・・・ 3-133
表 3.5-1　全体会議の開催実績 ・・・・・・ 3-135
表 3.5-2　東京電力 HD との意見交換会の開催実績 ・・・・・・ 3-136

図一覧

図 1-1	1F 廃炉支援基盤研究部門の位置付け	·····	1-1
図 1-2	原子炉廃止措置基盤研究センターの研究連携ハブ機能	·····	1-1
図 2.1-1	テラヘルツ/サブテラヘルツ波によるコンクリート構造物の探傷技術の概念	·····	2-2
図 2.2-1	研究の実施体制	·····	2-3
図 3.1.1-1	SDOF 試験体の立面図	·····	3-2
図 3.1.1-2	解析性能曲線	·····	3-3
図 3.1.1-3	性能曲線	·····	3-5
図 3.1.1-4	応答変位（変形性状）の推定精度	·····	3-5
図 3.1.1-5	剛性分布の推定の概要	·····	3-6
図 3.1.1-6	各階剛性分布の推定	·····	3-6
図 3.1.1-7	周期の比較	·····	3-8
図 3.1.1-8	剛性の比較	·····	3-9
図 3.1.1-9	性能曲線の補正と応答評価の概念図	·····	3-10
図 3.1.1-10	係数倍法の概要	·····	3-11
図 3.1.1-11	誤差の求め方	·····	3-11
図 3.1.1-12	2 次曲線フィッティング法の概念図	·····	3-11
図 3.1.1-13	特性点フィッティング法の概念図	·····	3-13
図 3.1.1-14	等価粘性減衰定数の補正方法	·····	3-14
図 3.1.1-15	特性点に基づく被災度の区分手法	·····	3-15
図 3.1.1-16	応答予測と被災度の同定手法	·····	3-15
図 3.1.2-1	振動実験装置図（試験体 No.4）	·····	3-16
図 3.1.2-2	変位計で測定した壁頭の時刻歴応答変位（試験体 No.3、加振 No.7）	·····	3-17
図 3.1.2-3	試験体 No.4 の入力変位波（最大速度 50 kine）	·····	3-18
図 3.1.2-4	変位計で測定した壁頭の時刻歴応答変位（試験体 No.4、加振 No.5）	·····	3-19
図 3.1.2-5	ジャイロセンサの測定値から回転角を算出する積分方法	·····	3-19
図 3.1.2-6	センサの測定値と変形曲線の同定方法	·····	3-20
図 3.1.2-7	変位計とジャイロセンサによる壁頭ねじれ角の比較（試験体 No.3）	·····	3-20
図 3.1.2-8	変位計とジャイロセンサによる壁頭水平変位の比較（試験体 No.2）	·····	3-21
図 3.1.2-9	変位計とジャイロセンサによる壁頭水平変位の比較（試験体 No.4）	·····	3-22
図 3.1.2-10	建物の変形算出の概念図	·····	3-23
図 3.1.2-11	第 i 層の部材座標系と部材変形の同定	·····	3-23
図 3.1.2-12	センサ最適配置の検討システムと活用方法のフロー	·····	3-26
図 3.1.2-13	有限要素モデルの全体図	·····	3-26
図 3.1.2-14	有限要素モデル地下 1 階平面（単位：m）	·····	3-27

図 3.1.2-15　詳細モデルで仮定した損傷状況（床スラブ）　……　3-27
図 3.1.2-16　詳細モデルで仮定した損傷状況（外壁）　……　3-28
図 3.1.2-17　簡易モデルで仮定した損傷状況（床スラブ）　……　3-28
図 3.1.2-18　詳細モデルで仮定した損傷状況（外壁）　……　3-29
図 3.1.2-19　簡易モデルへの入力地動加速度　……　3-29
図 3.1.2-20　簡易モデルの建物頂部の時刻歴応答変位　……　3-30
図 3.1.2-21　詳細モデルの静的加力結果　……　3-30
図 3.1.2-22　詳細モデルの最小主応力コンター（南側外壁面）、単位：N/mm^2　……　3-31
図 3.1.2-23　最大変位時の西側外壁筋の降伏状況（詳細モデル）　……　3-31
図 3.1.2-24　除荷時の残留変形（詳細モデル）、変形倍率：500 倍　……　3-31
図 3.1.2-25　センサの設置想定位置（南側外壁）　……　3-32
図 3.1.2-26　FEM 解析値と変位算定値の比較（詳細モデル）　……　3-32
図 3.1.2-27　最大変位時の床スラブ外郭（詳細モデル）、変形倍率：200 倍　……　3-33
図 3.2.1-1　試験体のひび割れ幅とサブテラヘルツ波の透過及び反射の関係　……　3-35
図 3.2.1-2　コンクリート試験体の透過率測定結果（コンクリート膜厚：5 mm）　……　3-37
図 3.2.1-3　スペクトルの偏光強度比（亀裂の幅：3 mm）　……　3-38
図 3.2.1-4　亀裂の幅による偏光強度減衰位置の変化　……　3-38
図 3.2.1-5　スペクトルの偏光強度比（かぶり深さ：10 mm）　……　3-39
図 3.2.1-6　かぶり深さによる偏光強度ピーク位置の変化　……　3-39
図 3.2.1-7　テラヘルツ周波数帯における鉄酸化物の反射スペクトル　……　3-40
図 3.2.1-8　テラヘルツ周波数帯における鉄水酸化物の反射スペクトル　……　3-40
図 3.2.1-9　鉄酸化物を Fe_3O_4 に調製した時の吸収スペクトルの変化　……　3-40
図 3.2.1-10　含水率が異なる木材の透過率（63.5 GHz）　……　3-41
図 3.2.1-11　4 次元イメージングの測定サンプル（左）とイメージデータ（右）　……　3-42
図 3.2.1-12　4 次元イメージングによる内部亀裂の検出（左）測定サンプルの外観、（右）偏光解析処理した画像データ　……　3-42
図 3.2.1-13　4 次元イメージングによる内部鉄筋の検出（a)未処理、(b)平均化、(c)FFT 処理、(d)微分フィルターを適用した FFT 処理　……　3-43
図 3.2.1-14　模擬コンクリートで覆われた金属板からのテラヘルツ反射率　……　3-44
図 3.2.1-15　表層下にある損傷の近距離診断フロー　……　3-45
図 3.2.1-16　同一の試験体に対する中性子とサブテラヘルツによるイメージング　……　3-46
図 3.2.2-1　遠隔診断を志向した光学系の模式図（上）と外観（下）　……　3-47
図 3.2.2-2　遠隔測定系においてサブテラヘルツ光源に対する試験体の各距離における反射強度　……　3-48
図 3.2.2-3　コンクリート下に隠れている模擬鉄筋（コイン）とそのイメージング　……　3-49
図 3.2.2-4　コンクリート試験体におけるペースト部の水分量を変化させた試料に対する 60 GHｚの反射率と透過率変化　……　3-50

図 3.2.2-5　含水試験片を含む試験体画像（左）と反射率の分光イメージング（右）　……　3-50
図 3.2.2-6　金属腐食生成物α-FeOOH、α-Fe_2O_3の反射率スペクトル　……　3-51
図 3.2.2-7　試験体表面からの反射スペクトル　……　3-51
図 3.2.2-8　遠隔診断実験系の模式図　……　3-52
図 3.2.2-9　光源と試験体の距離と反射強度の関係　……　3-53
図 3.2.2-10　ひび割れ部を持つコンクリート試験体に対する電磁波（120 GHz）の反射強度変化　……　3-53
図 3.2.2-11　含水試験体に対する電磁波（120 GHz）の反射強度変化　……　3-54
図 3.2.3-1　試験条件決定に用いた試験体の図と測定結果　……　3-55
図 3.2.3-2　RC 模擬試験体の仕様の概念図　……　3-56
図 3.2.3-3　カットした試験体　……　3-57
図 3.2.3-4　模擬スリット導入試験体の 3D 像（左）及び中央部断面像（右）　……　3-58
図 3.2.3-5　ひび割れを導入した試験体（左）及び中央部断面像（右）　……　3-58
図 3.2.3-6　鉄筋を入れた試験体の 3D 像（左）及び中央部断面像（右）　……　3-59
図 3.2.3-7　TNRF において計測している様子（左）及び透過像（右）　……　3-60
図 3.2.3-8　CT 断面像及び直径部分の透過強度変化　……　3-60
図 3.2.3-9　コンクリート CT 画像より作成した中央部縦断面（左）及び鉄筋付近の透過強度比（右）　……　3-61
図 3.2.3-10　コンクリート内で腐食を加速させた試験体における縦及び横断面像　……　3-62
図 3.3.1-1　急速凍結融解試験の手順と測定項目　……　3-67
図 3.3.1-2　急速凍結融解試験装置　……　3-67
図 3.3.1-3　サブテラヘルツ計測の概要　……　3-68
図 3.3.1-4　急速凍結融解サイクルを与えたコンクリートの応力とひずみの関係　……　3-69
図 3.3.1-5　急速凍結融解サイクル数と圧縮強度の関係　……　3-69
図 3.3.1-6　急速凍結融解サイクル数とヤング係数の関係　……　3-70
図 3.3.1-7　急速凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係　……　3-70
図 3.3.1-8　周波数と反射強度の関係　……　3-71
図 3.3.1-9　平均反射強度と圧縮強度の関係　……　3-71
図 3.3.1-10　平均反射強度とヤング係数の関係　……　3-71
図 3.3.1-11　反射強度と圧縮強度の関係（34.8 GHz）　……　3-71
図 3.3.1-12　反射強度とヤング係数の関係（34.8 GHz）　……　3-71
図 3.3.1-13　反射強度と圧縮強度の関係　（45.8 GHz）　……　3-72
図 3.3.1-14　反射強度とヤング係数の関係（45.8 GHz）　……　3-72
図 3.3.2-1　内部劣化を模擬したコンクリート壁模擬試験体の試験体形状　……　3-76
図 3.3.2-2　損傷したコンクリート梁模擬試験体　……　3-77
図 3.3.2-3　含水率の推定に用いる試験体形状　……　3-78
図 3.3.2-4　端島（軍艦島）構造物の RC における測定位置　……　3-78
図 3.3.2-5　サブテラヘルツ波光学測定装置及び測定状況　……　3-79
図 3.3.2-6　測定面に対する測定距離と測定角度の調整方法　……　3-80
図 3.3.2-7　コンクリート壁模擬試験体①～⑥の測定位置　……　3-81

図 3.3.2-8　損傷したコンクリート梁模擬試験体の測定位置 ・・・・・・ 3-82
図 3.3.2-9　コンクリート壁模擬試験体⑦～⑨の測定位置 ・・・・・・ 3-82
図 3.3.2-10　端島（軍艦島）構造物の測定位置 ・・・・・・ 3-82
図 3.3.2-11　既存測定技術の測定状況 ・・・・・・ 3-83
図 3.3.2-12　内部劣化の反射強度分布（コンクリート壁模擬試験体①～⑥） ・・・・・・ 3-85
図 3.3.2-13　電磁波レーダによる検知 ・・・・・・ 3-87
図 3.3.2-14　超音波イメージスキャナーによる検知 ・・・・・・ 3-88
図 3.3.2-15　赤外線サーモグラフィーによる検知 ・・・・・・ 3-89
図 3.3.2-16　損傷したコンクリート梁模擬試験体の反射強度分布 ・・・・・・ 3-91
図 3.3.2-17　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑦、測定周波数：9.4 GHz） ・・・・・・ 3-93
図 3.3.2-18　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑦、測定周波数：10.9 GHz） ・・・・・・ 3-93
図 3.3.2-19　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑦、測定周波数：11.5 GHz） ・・・・・・ 3-94
図 3.3.2-20　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑦、測定周波数：12.3 GHz） ・・・・・・ 3-94
図 3.3.2-21　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑧、測定周波数：9.4～12.3 GHz） ・・・・・・ 3-95
図 3.3.2-22　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑨、測定周波数：9.4 GHz） ・・・・・・ 3-96
図 3.3.2-23　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑨、測定周波数：10.9 GHz） ・・・・・・ 3-96
図 3.3.2-24　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑨、測定周波数：11.5 GHz） ・・・・・・ 3-97
図 3.3.2-25　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑨、測定周波数：12.3 GHz） ・・・・・・ 3-97
図 3.3.2-26　接触型電気抵抗式含水率計による含水率分布 ・・・・・・ 3-98
図 3.3.2-27　端島（軍艦島）構造物の反射強度分布及び含水率分布 ・・・・・・ 3-99
図 3.3.3-1　ひび割れたコンクリートの応力ーひずみ曲線 ・・・・・・ 3-101
図 3.3.3-2　ひび割れによる材料特性劣化 ・・・・・・ 3-102
図 3.3.3-3　コンクリートの損傷程度（凍結融解サイクル数）と力学特性
劣化の関係 ・・・・・・ 3-103
図 3.3.3-4　壁面における仮定した損傷箇所 ・・・・・・ 3-105
図 3.3.3-5　解析モデル ・・・・・・ 3-106
図 3.3.3-6　コンクリートの材料構成則 ・・・・・・ 3-107
図 3.3.3-7　各損傷程度におけるコンクリートの応力ひずみ関係 ・・・・・・ 3-109
図 3.3.3-8　コンクリート損傷程度「軽微」の圧縮側構成則 ・・・・・・ 3-110
図 3.3.3-9　コンクリート損傷程度「小」の圧縮側構成則 ・・・・・・ 3-110
図 3.3.3-10　コンクリート損傷程度「中」、「大」の圧縮側構成則 ・・・・・・ 3-110
図 3.3.3-11　損傷を有するコンクリートの引張側構成則 ・・・・・・ 3-111
図 3.3.3-12　コンクリートー壁筋間の付着応力ーすべり量関係 ・・・・・・ 3-111
図 3.3.3-13　層せん断力ー層間変形角関係 ・・・・・・ 3-113

図 3.3.3-14　損傷程度「小」モデルの最大耐力時における最大主ひずみ分布　・・・・・・　3-114
図 3.3.3-15　最大耐力までの割線剛性（2 次剛性）について　・・・・・・　3-115
図 3.4-1　原子炉建屋の構造特性　・・・・・・　3-118
図 3.4-2　地震観測記録－加速度と応答変位（令和 3 年 3 月）　・・・・・・　3-119
図 3.4-3　観測記録の等価粘性減衰定数　・・・・・・　3-119
図 3.4-4　応答予測結果　・・・・・・　3-119
図 3.4-5　負圧管理による閉じ込め機能（気相部）の構築例　・・・・・・　3-120
図 3.4-6　本研究の中における長期保全計画の位置付け　・・・・・・　3-121
図 3.4-7　長期保全計画のイメージ　・・・・・・　3-123
図 3.4-8　建屋の着目すべき箇所と検査・モニタリング方法　・・・・・・　3-124
図 3.4-9　「損傷リスク重要度」概念の導入　・・・・・・　3-124
図 3.4-10　RC の劣化シナリオ　・・・・・・　3-125
図 3.4-11　大地震を経験した原子炉建屋の調査結果　・・・・・・　3-125
図 3.4-12　「保全守備範囲」の絞り込み　・・・・・・　3-126
図 3.4-13　「保全守備範囲」の絞り込みと「重要度」概念の導入　・・・・・・　3-126
図 3.4-14　加速度センサによる地震時建屋応答モニタリングシステム　・・・・・・　3-127
図 3.4-15　加速度/ジャイロセンサによる壁床傾斜計測システム　・・・・・・　3-128
図 3.4-16　テラヘルツ/サブテラヘルツ波による探傷システム　・・・・・・　3-128
図 3.4-17　検査・モニタリングで得られるデータ・情報と建屋健全性評価の関係　・・・・・・　3-129
図 3.4-18　検査・モニタリング手順と劣化兆候の現れるパラメータの関係　・・・・・・　3-129

写真一覧

写真 3.1.1-1　SDOF 試験体の立面写真　・・・・・・　3-3
写真 3.1.1-2　2DOF 試験体の立面写真　・・・・・・　3-8

略語一覧

1F	:	東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所	
AE	:	Air Entraining	(空気連行)
CFReND	:	Center for Fundamental Research on Nuclear Decommissioning	(原子炉廃止措置基盤研究センター)
CLADS	:	Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science	(廃炉環境国際共同研究センター)
CMOS	:	Complementary Metal Oxide Semiconductor	(相補性金属酸化膜半導体)
FE	:	Finite Element	(有限要素)
FEM	:	Finite Element Method	(有限要素法)
FFT	:	Fast Fourier Transform	(高速フーリエ変換)
JIS	:	Japanese Industrial Standards	(日本産業規格)
JMA	:	Japan Meteorological Agency	(気象庁)
JRR-3	:	Japan Research Reactor No.3	(研究用原子炉 3 号炉)
MDPI	:	Molecular Diversity Preservation International	(オープンアクセス専門の学術出版社)
NS	:	North-South	(南北)
PCV	:	Primary Containment Vessel	(原子炉格納容器)
PGA	:	Peak Ground Acceleration	(最大地動加速度)
PC 鋼棒	:	Prestressed Concrete Steelbar	(プレストレスト・コンクリート鋼棒)
PIRT	:	Phenomena Identification and Ranking Table	(重要度ランク表)
RC	:	Reinforced Concrete	(鉄筋コンクリート)
RPV	:	Reactor Pressure Vessel	(原子炉圧力容器)
SDOF	:	Single Degree Of Freedom	(1 自由度)
THz-TDS	:	Terahertz Time-Domain Spectroscopy	(テラヘルツ時間領域分光)
TNRF	:	Thermal Neutron Radiography Facility	(熱中性子ラジオグラフィー装置)
東京電力HD	:	東京電力ホールディングス株式会社	

概略

(1) 本研究の背景

東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所（以下、1F という。）では東北地方太平洋沖地震をきっかけに発生した事故の収束に向けて、国の威信をかけてオールジャパン体制で中長期ロードマップに基づき廃止措置に取り組んでいる[Ⅰ],[Ⅱ]。

国立大学法人東北大学（以下、東北大学という。）は東日本大震災からの復興・新生を先導することを歴史的使命であると考えており、平成 25 年に制定した全学ビジョン（里見ビジョン）の中でも「復興・新生の先導」を 2 大目標の 1 つとした[Ⅲ]。この目標を達成するため、震災直後に開始した 8 つの全学的プロジェクトと 100 を超える構成員提案型プロジェクトを継続的に推進するとともに、復興を加速するための新規プロジェクトを立案・開始することとした。その 1 つが本研究を位置付けている「福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置に向けた基礎・基盤研究と人材育成の推進」である。その後、平成 30 年に制定された新たな全学ビジョン（東北大学ビジョン 2030）においても重点戦略「震災復興から持続可能な社会創造を見据えた新たな課題解決型研究の展開」の中に位置付けて取り組んできており[Ⅳ]、この活動は東北大学が掲げる SDG s である「社会にインパクトある研究」の 30 プロジェクトなどをさらに発展させ、新たに「Green Technology」、「Recovery & Resilience」、「Social Innovation & Inclusion」の 3 つの柱の下、グリーン未来社会の実現に貢献することを目的として令和 3 年 4 月に設置された「グリーン未来創造機構」の活動に位置付けられている[Ⅴ]。

以上のような経緯の中、東北大学は工学系を中心とした広範な分野の研究室が連携した全学横断組織である「原子炉廃止措置基盤研究センター（Center for Fundamental Research on Nuclear Decommissioning：以下、CFReND という。）」を平成 28 年 12 月 1 日に設置し、廃止措置に関する基盤研究及びそれを担う人材の育成に取り組んでいる。本研究では、この CFReND を研究のプラットフォームとし、関係する本学教員に加え、学校法人芝浦工業大学（以下、芝浦工業大学という。）、国立大学法人東京工業大学（以下、東京工業大学という。）、学校法人日本工業大学（以下、日本工業大学という。）、独立行政法人国立高等専門学校機構木更津工業高等専門学校（以下、木更津高専という。）、公立大学法人大阪公立大学（以下、大阪公立大学という。）、国立大学法人岡山大学（以下、岡山大学という。）及び日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という。）の専門家の協力を得て、令和 3 年度から 5 年度までの予定で、研究を実施している。

(2) 令和 3 年度の成果概要

初年度である令和 3 年度は、具体的な研究方法を明確にして研究の方向付けを行うとともに、必要な試験などを実施するための諸準備を行い、本格的な研究を行うための諸条件を整えるとともに、人材育成面においては、原子炉廃止措置に関する教育プログラムの準備を進める必要があった。このため、第 5 項で述べる実施内容の項目のうち、令和 4 年度から開始予定の③3)を除く項目の令和 3 年度分が計画通り実施され、当初想定していた成果が得られた。この成果により、今後予定している研究の準備が整うとともに、一部試験を実施し、その成果も得られたので、令和 4 年度の研究が実施できる状況となった。

(3) 令和 4 年度の成果概要

令和 3 年度の成果を踏まえ、試験、解析等の実施を通じて、最終年度となる令和 5 年度に向けて本研究の最終的な成果のまとめ方を見通すことを目的として、すべての項目について実施内容を計画通りに実施し、当初想定していた成果が得られた。また、人材育成面においては、

原子炉廃止措置に関する教育プログラムを実践することができた。この成果により、最終年度となる令和 5 年度に向けて本研究の最終的な成果のまとめ方を見通すことができたので、令和 5 年度の研究が実施できる状況となった。

(4) 令和 5 年度に解決すべき課題

最終年度となる令和 5 年度は、令和 4 年度に見通した本研究の最終的な成果のまとめ方に従い、試験・解析等を実施し、それらの結果に基づく考察等の検討について、(6)で述べる実施内容を計画通り実施し、本研究の最終的な成果としてまとめる必要がある。また、人材育成面においては、原子炉廃止措置に関する教育プログラムを実践していく必要がある。

(5) 令和 5 年度の本研究の目的

令和 5 年度は、令和 4 年度までの成果を踏まえ、試験、解析等の実施を通じて、最終年度として本研究の最終的な成果をまとめることを目的とする。

(6) 令和 5 年度の研究の実施内容

令和 5 年度に実施した内容を以下に示す。

① 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発

1) 動的応答・振動性状の観測及び評価

- 小型建屋模型実験の結果に基づいて、加速度センサによる応答観測記録から、建屋の応答及び変形性状を推定する方法を開発する。
- 解析モデルとセンサデータを組み合わせた、建屋の振動性状（周期特性)、応答変形、復元力特性（荷重変形曲線）を評価するモニタリングシステムを開発する。

2) 長期変形性状の観測及び評価（再委託先：東京工業大学）

- 部材実験の結果を基に、建物に配置したセンサから建物の挙動を算出する方法を開発する。
- FEM（Finite Element Metod：有限要素法）による数値解析により、センサの最適配置を検討するシステムを開発する。FE（Finite Element：有限要素）モデルは、シェル要素などを用いた簡易なものとする。数値解析により、想定したセンサの設置位置での回転角を、振動時及び静止時で計算し、それらの結果から建物の変形を算定し、視覚的にアウトプットする。

② 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発

1) テラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：芝浦工業大学）

- サブテラヘルツ波からテラヘルツ波のイメージデータを対象とする画像処理により、コンクリート構造物内部の損傷イメージとして、表層下にあるひびのサイズと位置、水分ならびに腐食生成物の分布を視覚化するアルゴリズムを構築する。

2) サブテラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：木更津高専）

- コンクリート構造物の表面を移動して、サブテラヘルツ波の反射イメージング測定が遠隔操作できるシステムとして改良し、表層下にひびや含水部、内部の鉄筋腐食があるコンクリート試験体に対する測定を行い、視覚化のための解析アルゴリズム検討にデータを提供する。

3) 中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証
（連携先：原子力機構）

・ テラヘルツイメージング技術の検証に用いる鉄筋コンクリート（Reinforced Concrete：以下、RC という。）試験体内部のひび割れ位置とサイズをより詳細に決定するために、JRR-3（Japan Research Reactor No.3：研究用原子炉 3 号炉）の TNRF（Thermal Neutron Radiography Facility：熱中性子ラジオグラフィー装置）等を使用した高分解能 3 次元中性子イメージング実験を行い、試験体内部にあるひび割れの位置とサイズ、深さを精密に測定する。
・ 上述した測定を通じて、様々な条件の RC 試験体について、多くの詳細なデータを蓄積する。

③ 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発

1) コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価

・ テラ（サブテラ）ヘルツ波イメージング技術を用いて、力学特性の低下を伴う劣化が生じているコンクリートの内部劣化状態の測定を行い、測定結果の解釈（力学特性への変換）とそのキャリブレーション方法を開発する。

2) 鉄筋腐食と付着不良・剥離等に基づく材料特性の評価（再委託先：日本工業大学）

・ 内部劣化（ひび割れ）や異なる含水分布を有するコンクリート壁模擬試験体と実構造物においてテラ（サブテラ）ヘルツ波による反射強度の測定を行い、含水状態や内部劣化状態を推定する。既存の測定技術（超音波法・打診法・赤外線・接触式含水率計など）との比較によって、実構造物を対象としたテラ（サブテラ）ヘルツ波計測系の適用性及び適用範囲を検証する。

3) 材料劣化特性に基づく部材の耐震性能評価（再委託先：大阪公立大学）

・ 材料の力学特性変化を考慮した耐震壁等の RC 部材の残存性能について、3 次元 FEM 解析により定量的に評価する。また、これらを簡易に判別可能な耐震性能評価マトリクスを作成する。

④ 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案

・ 様々な観測データを用いた総合的な建屋構造健全性評価手法を開発する。
・ 建屋長期保全計画案を提案する。

⑤ 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）等、1F との連携を密にして研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打ち合わせや会議等を開催する。

(7) 令和 5 年度の成果

前項で述べた実施内容が計画通り実施され、当初想定していた成果が得られた。また、人材育成面においては、原子炉廃止措置に関する教育プログラムを実践することができた。

令和４年度までの成果報告書：

- 建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究（委託研究）
  令和３年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業
  JAEA-Review 2022-071
  https://doi.org/10.11484/jaea-review-2022-071

- 建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究（委託研究）
  令和４年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業
  JAEA-Review 2023-048
  https://doi.org/10.11484/jaea-review-2023-048

1. はじめに

東北大学は、東北地方における研究拠点として 1F の安全かつ着実な廃炉の推進に資するため、基礎･基盤的な研究と技術開発ならびに人材育成に努めてきた。この間、文部科学省『英知を結集した原子力科学技術･人材育成推進事業　廃止措置研究･人材育成等強化プログラム』に平成 26 年から 5 年間取り組み、成果を挙げることができた。この研究で確立した基盤を活用し、それまでの活動をさらに発展させるとともに、廃炉に関する我が国の基礎･基盤研究をリードするため、全学を横断した災害復興新生研究機構の構成組織として「CFReND」を平成 28 年 12 月 1 日に設置し、その後、令和 2 年 4 月に「福島第一原子力発電所廃炉支援基盤研究部門」を設置して、学内の広範囲な学術と技術の結集による全学的な取り組みの推進を図ることで着実かつ安全な廃炉等に継続的に貢献する体制を整備するとともに、より効果的な 1F 廃炉への貢献が可能な体制を整備した（図 1-1）。

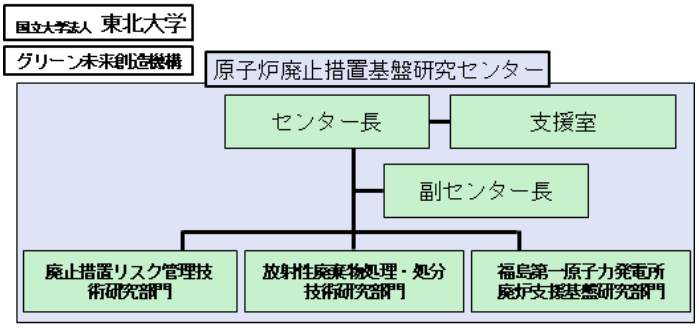


図1-1　1F 廃炉支援基盤研究部門の位置付け

CFReND は、外部機関と本学をつなぐ橋渡し役として外部組織のニーズを咀嚼して学内へ伝え、学内のシーズや考え方を外部へ分かりやすく伝えるインタープリター機能（ハブ機能）を果たすとともに（図 1-2）、このような実践的研究の場を活用して廃炉を担う次世代人材の養成にも貢献することとしている。

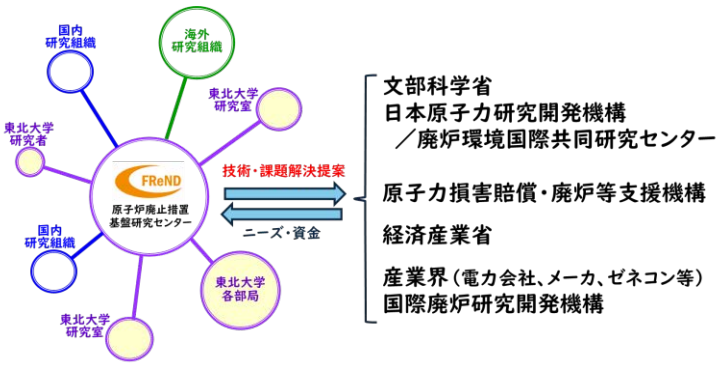


図1-2　原子炉廃止措置基盤研究センターの研究連携ハブ機能

今回、原子炉廃止措置の現場のニーズを踏まえた優先研究課題の 1 つとして、「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」に取り組む。本研究では具体的目標を設けて現場で役立つ技術の基盤となる成果の創出を目指す。

2. 業務計画

2.1 全体計画

1F 廃炉作業は数十年を要すると言われている燃料デブリ取り出し後も除染・解体撤去のため長期に亘って原子炉建屋の安全機能（特に構造強度）が期待されている事業であり、完了するまでの期間、継続的に建屋を直接検査・モニタリングし、その結果を用いて健全性を評価･確認するとともに、必要に応じて補修などを実施することによって安全機能を確保することは保全学が求める鉄則であり、困難な状況の中でもこれを可能な限り踏襲することが極めて重要である。そこで、本研究では、前述のような前例のない特殊かつ困難な条件下で 1F 原子炉建屋の保全管理を実施することを想定して、戦略的かつ効率的・効果的な保全管理方法確立に向け、東北大学、東京工業大学、芝浦工業大学、木更津高専、日本工業大学、大阪公立大学､原子力機構が各組織の特徴と適性に沿って下記 4 つの課題に分担･連携して取り組み、1F 廃炉に貢献する。

① 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発
② 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発
③ 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発
④ 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案

研究課題① 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発

課題①-1：一般建物の地震ヘルスモニタリング技術があるが、1F 建屋では高放射線下で新たに設置できるセンサの設置箇所、数に大きな制約と困難がある中で、設置可能な場所から効果的かつ最適な設置箇所を選定し、必要最小数で地震観測を行う技術を開発する。観測データを用いて逐次解析モデルを修正し、解析結果と組み合わせて非観測部位の応答振動性状も推定するハイブリッド型応答・振動推定法を新たに開発する（表 2.1-1）。

表 2.1-1 本研究の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法

	既往のモニタリング	本提案
センサ設置位置	必要箇所	限定
センサの数	必要数	極めて少数
対象	地震のみ	地震＋長期
解析モデル	設計モデル	逐次修正モデル

課題①-2：一般に動的振動応答の計測に使用される加速度センサ・ジャイロセンサを長期計測に適用するのは全く新しい発想で、これにより部材・建屋の長期変形性状を観測しようとする全く新しいモニタリング法を開発する。上記①-1 で得られる多面的な振動性状、応答・変形性状の観測データを組み合わせて構造健全性を評価できるようにする。

研究課題② 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発

課題②-1：従来のコンクリート構造物の損傷調査である目視・打音検査、コアサンプリングに代わり、電磁波をコンクリート躯体に照射して、その反射波から表面のみならず内部のひび割れや鉄筋腐食、水分の存在を検知する、これまでにない全く新しい非接触検査技術を開発する（表 2.1-2）。これは、異なる周波数レンジの電磁波を用いることで、探知するコンクリート躯体の領域の広さ、深さを調整し、サブテラヘルツ波による 1 次調査（大まかな損傷の有無）

表 2.1-2 本研究のコンクリート構造物損傷検知技術

	既往の損傷検知	本提案
方法	目視、打音、接触	電磁波
作業位置	×接近	○離れて遠隔操作可
遮蔽物	×不可	◎塗装、仕上げを透視 ○内部損傷
精度		使用する電磁波に依存

からテラヘルツ波による詳細調査（損傷箇所）まで対応できる方法であり、コンクリート躯体表面に塗装や仕上げ材などが存在しても内部の損傷を透視できる技術である（図 2.1-1）。

課題②-2：中性子イメージング技術（JRR-3）はコンクリートなどの内部欠陥の詳細な観察ができる。この技術により、テラヘルツ波イメージングの精度を検証し信頼性を高める。

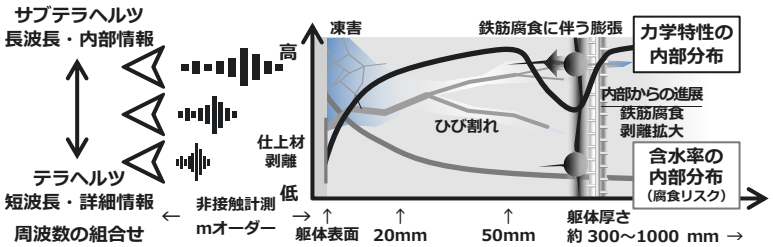


図 2.1-1　テラヘルツ/サブテラヘルツ波によるコンクリート構造物の探傷技術の概念

研究課題③ 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発

課題③-1：1F 建屋は、地震後の津波、爆発などにより、コンクリート躯体に振動・衝撃、塩分、高温、放射線などの複合的な劣化要因が作用した。これらの既存の劣化要因の実験データと電磁波イメージング画像とを組み合わせ、コンクリートの材料（劣化）特性、鉄筋腐食推定、RC 部材の構造特性（荷重－変形特性）について、その現状及び長期経年劣化の推定方法を明確にする（表 2.1-3）。

表 2.1-3　本研究のコンクリート材料の経年劣化の推定法

	既往の材料特性・構造部材の劣化性能評価	本提案
コンクリート	熱、中性化、ひび割れなどの要因ごと	複合要因 イメージング・データの活用
鉄筋		イメージング・データの活用
部材	地震のみ	部材実験 イメージング・データの活用
建屋	無し	

課題③-2：イメージング画像からコンクリート内部の鉄筋腐食、付着劣化を定量評価するための試験・検討を実施する。

研究課題④ 総合的な建屋健全性評価手法の開発と長期保全計画の検討

課題①モニタリングで得られる、地震などの外乱発生時の建屋の振動性状（周期特性）、地震時の最大応答変形（非観測位置の推定値も含む。）、長期観測による変形に基づいて、建屋の構造健全性に関わる異常の発生を速やかに探知する方法を開発する。必要に応じて検査を行い、課題②で電磁波イメージを取得し、課題③で劣化性能を推定することを想定している。1F 建屋の厳しい環境の中で、個々の要素技術で得られる情報は限られ、精度にも限界があるが、これらを組み合わせ、総合的に評価することで、1F に原子炉建屋の構造健全性評価に必要な精度を有するハイブリッド型構造健全性評価法の開発を目指す。

2.2　実施体制

本研究の実施体制を図 2.2-1 に示す。

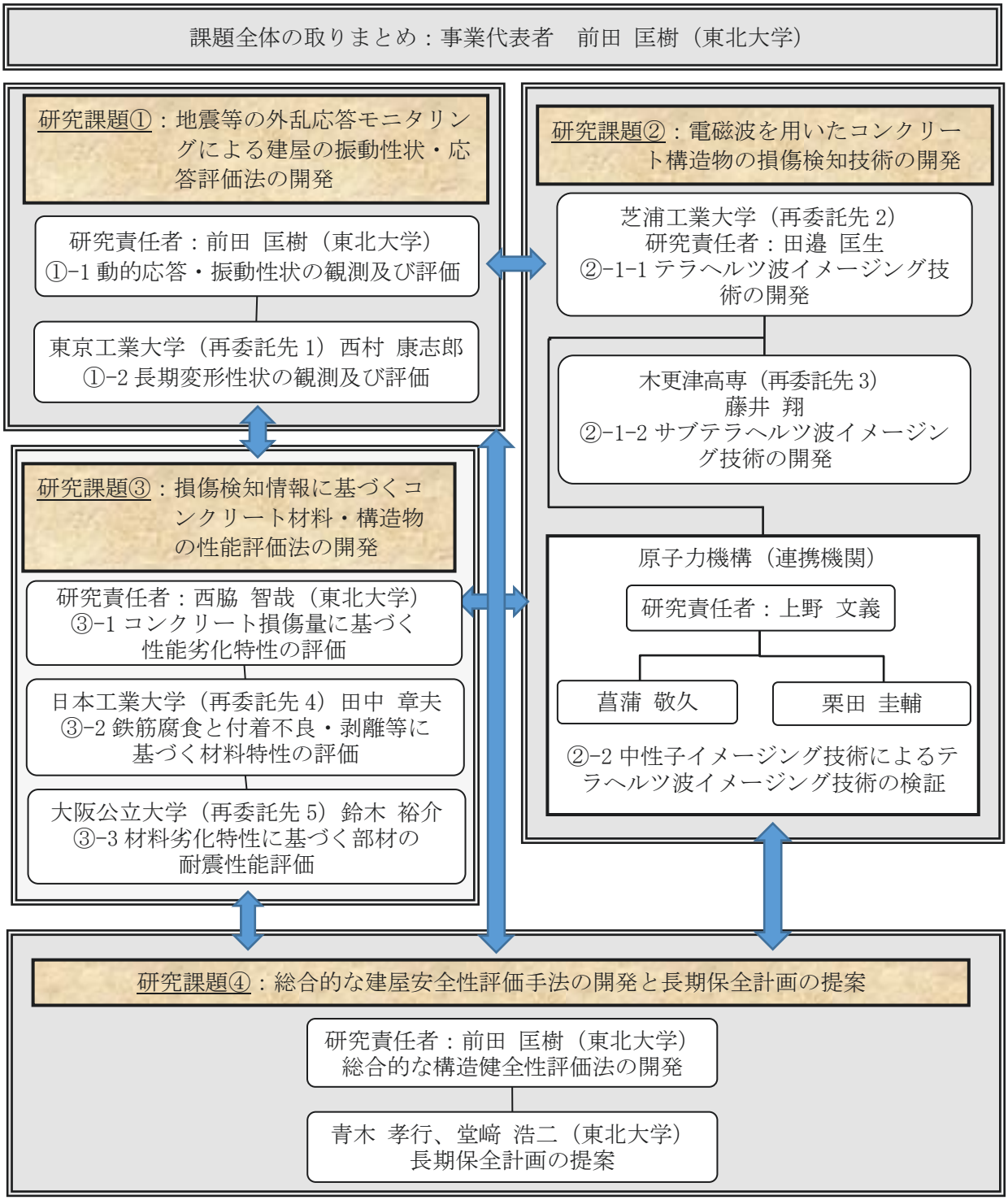


図 2.2-1　研究の実施体制

2.3　令和 5 年度の成果の目標及び業務の実施方法

2.3.1　実施内容

(1)　地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発

①　動的応答・振動性状の観測及び評価

・　小型建屋模型実験の結果に基づいて、加速度センサによる応答観測記録から、建屋の応答及び変形性状を推定する方法を開発する。

・　解析モデルとセンサデータを組み合わせた、建屋の振動性状（周期特性）、応答変形、復元力特性（荷重変形曲線）を評価するモニタリングシステムを開発する。

②　長期変形性状の観測及び評価（再委託先：東京工業大学）

・　部材実験の結果を基に、建物に配置したセンサから建物の挙動を算出する方法を開発する。

・　FEM による数値解析により、センサの最適配置を検討するシステムを開発する。FE モデルは、シェル要素などを用いた簡易なものとする。数値解析により、想定したセンサの設置位置での回転角を、振動時及び静止時で計算し、それらの結果から建物の変形を算定し、視覚的にアウトプットする。

(2)　電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発

①　テラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：芝浦工業大学）

・　サブテラヘルツ波からテラヘルツ波のイメージデータを対象とする画像処理により、コンクリート構造物内部の損傷イメージとして、表層下にあるひびのサイズと位置、水分ならびに腐食生成物の分布を視覚化するアルゴリズムを構築する。

②　サブテラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：木更津高専）

・　コンクリート構造物の表面を移動して、サブテラヘルツ波の反射イメージング測定が遠隔操作できるシステムとして改良し、表層下にひびや含水部、内部の鉄筋腐食があるコンクリート試験体に対する測定を行い、視覚化のための解析アルゴリズム検討にデータを提供する。

③　中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証（連携先：原子力機構）

・　テラヘルツイメージング技術の検証に用いる RC 試験体内部のひび割れ位置とサイズをより詳細に決定するために、JRR-3 の TNRF 等を使用した高分解能 3 次元中性子イメージング実験を行い、試験体内部にあるひび割れの位置とサイズ、深さを精密に測定する。

・　上述した測定を通じて、様々な条件の RC 試験体について、多くの詳細なデータを蓄積する。

(3)　損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発

①　コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価

・ テラ（サブテラ）ヘルツ波イメージング技術を用いて、力学特性の低下を伴う劣化が生じているコンクリートの内部劣化状態の測定を行い、測定結果の解釈（力学特性への変換）とそのキャリブレーション方法を開発する。

② 鉄筋腐食と付着不良・剥離等に基づく材料特性の評価（再委託先：日本工業大学）

・ 内部劣化（ひび割れ）や異なる含水分布を有するコンクリート壁模擬試験体と実構造物においてテラ（サブテラ）ヘルツ波による反射強度の測定を行い、含水状態や内部劣化状態を推定する。既存の測定技術（超音波法・打診法・赤外線・接触式含水率計など）との比較によって、実構造物を対象としたテラ（サブテラ）ヘルツ波計測系の適用性及び適用範囲を検証する。

③ 材料劣化特性に基づく部材の耐震性能評価（再委託先：大阪公立大学）

・ 材料の力学特性変化を考慮した耐震壁等の RC 部材の残存性能について、3 次元 FEM 解析により定量的に評価する。また、これらを簡易に判別可能な耐震性能評価マトリクスを作成する。

(4) 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案

・ 様々な観測データを用いた総合的な建屋構造健全性評価手法を開発する。
・ 建屋長期保全計画案を提案する。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等、1F との連携を密にして研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打ち合わせや会議等を開催する。

2.3.2　令和５年度の研究スケジュール

令和５年度の研究スケジュールを表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1　令和５年度研究スケジュール

題目　令和 5 年度「　建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究　月別年間計画

項目 ＼ 実施日程	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
(1) 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発												
①動的応答・振動性状の観測及び評価（東北大学）	モニタリングシステム縮小模型実験					モニタリングシステムの評価			動的応答・振動性状の評価			まとめ
②長期変形性状の観測及び評価（東京工業大学）	壁試験体の部材実験						建物挙動の算出方法開発			センサ配置の検討システムの開発		まとめ
(2) 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発												
①テラヘルツ波イメージング技術の開発（芝浦工業大学）	損傷イメージデータの整理					イメージ情報の理解と活用			解析手法の確立、検出精度の向上			まとめ
②サブテラヘルツ波イメージング技術の開発（木更津高専）	遠隔測定に適するビーム径と偏光方向の検討				反射率変化の解析パラメータデータ取得				反射率と内部状態の相関解明			まとめ
③中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証（原子力機構）	JRR-3等でのより詳細な模擬鉄筋コンクリート CT画像取得・解析								解析結果評価			まとめ
(3) 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発												
①コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価（東北大学）	劣化を導入したコンクリート試験体の作製とテラ(サブテラ)ヘルツ波イメージング計測						測定結果に基づくコンクリートの力学特性評価とキャリブレーション				試験結果評価	まとめ
②鉄筋腐食と付着不良・剥離等に基づく材料特性の評価（日本工業大学）	コンクリート部材の作製と測定条件の抽出						コンクリート部材／実構造物における測定				試験結果評価	まとめ
③材料劣化特性に基づく部材の耐震性能評価（大阪公立大学）	材料劣化に応じた耐震壁など鉄筋コンクリート造部材の構造特性評価							性能評価マトリクスの作成			検討結果評価	まとめ
(4) 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案（東北大学）	総合的な建屋構造健全性評価手法の開発と建屋長期保全計画案の提案											まとめ
(5) 研究推進	各研究課題の連携調整											
		△ 全体会議									△ 全体会議	まとめ

3. 実施内容及び成果

3.1 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発【令和 3 年度～令和 5 年度】

3.1.1 動的応答・振動性状の観測及び評価【令和 3 年度～令和 5 年度】

【令和 4 年度までの概要】

令和 3 年度には、以下の 3 項目について検討した。(1)東京電力 HD など専門家の協力を得て、1F 建屋の構造性能や解析モデルに関する情報を収集した。(2)建屋構造の解析モデルを設定し、各層での高次の振動モードの影響を検討した。(3)解析モデルによってセンサ位置のシミュレーションを行って、誤差が最小限となるように解析モデルを調整した上でセンサ非設置層の応答やセンサの最適な数と位置を評価した。その結果に基づき最少数の加速度センサの設置位置を提案した。

その結果、剛性分布・振動モードの形状に基づいて建屋を高さ方向に 3 分割し、それぞれの分割域に加速度センサを設置した場合を想定して解析した結果、建屋が弾性域にあると仮定すると、振動モード（1 次モード）を用いることで、2 個程度の加速度センサの記録により、各層の応答値が 15%程度の誤差で推定できることが分かった。

令和 4 年度には、以下の 4 項目について検討した。(1)小型建屋模型を用いて振動実験を実施し、応答と振動特性に関するデータを収集した。(2)損傷を想定して構造特性を変化させた小型建屋模型の振動実験を実施し、解析モデルの応答や振動性状と比較した。(3)小型建屋模型の振動実験と応答解析に基づいて、観測データを用いて限られた数のセンサで建屋の応答と振動特性を推定する方法を検討した。(4)加速度センサによる観測データに基づき、解析モデルを修正して応答や振動性状を同定する方法を検討した。

その結果、試験体の振動実験により、弾性範囲では、応答加速度及び応答変位が計測できること、また、応答計測値から振動周期や応答粘性減衰係数を推定できることを確認した。さらに、これらの計測値や推定値が、解析モデルから求めた数値と十分な精度で一致することを確認した。加速度センサによる応答加速度と 2 重積分して求めた応答変位から建屋の性能曲線に対して、誤差が小さくなるように解析モデルの性能曲線を補正する方法を検討し、誤差を最小とする補正方法、カルマンフィルターを用いる補正方法を開発し、既往の RC 架構の振動実験に適用して、十分な精度で補正できることを確認した。

【令和 5 年度実施内容及び成果】

令和 5 年度は、小型建屋模型実験の結果に基づいて、加速度センサによる応答観測記録から、建屋の応答及び変形性状を推定する方法を開発した。

また、解析モデルとセンサデータを組み合わせた、建屋の振動性状（周期特性）、応答変形、復元力特性（荷重変形曲線）を評価するモニタリングシステムを開発した。

(1) 小型模型実験による応答観測及び変形性状の推定方法

① 概要

加速度センサの記録を用いて構造物の現状評価を行い、将来の地震における応答と損傷レベルを予測する手法を発展させるために、2 つの実験を計画した。両実験とも、小型振動台においてアルミフレーム試験体に地震動を入力した。1 つ目の実験は、1 層の試験体であり、非線形応答となるように試験体を設計した。この 1 層の試験体につ

いて動的応答・振動性状・変形性状の評価を行った。2 つ目の実験は、1 階と 2 階の剛性を変化させた 2 層の試験体であり、線形応答となるように設計した。これにより、提案する固有周期に基づく各階剛性分布の推定方法を検証した。

② 1 質点系－非線形応答の実験

1）試験体の説明

非線形応答域の実験に使用した 1 層試験体は、表 3.1.1-1 に示す特性のアルミフレームである。立面図を図 3.1.1-1 と写真 3.1.1-1 に示す。フレームには 4 本の長柱と 1 本の短柱があり、短柱は降伏して塑性率が 2 より大きくなるように設計した。また、2 枚のアルミプレートを基礎と 1 階の床スラブとして使用した。1 階床の上部には、初期周期を増加させ、より大きな変位を発生させるために 20 kg の質量を取り付けた。

アルミフレームの初期剛性は、柱が両端固定の条件であると仮定し、表 3.1.1-1 に示す特性を用いて推定した。線形応答を観測するために用いた入力倍率の小さい地震動では、フレームの初期剛性の実測値は推定値よりも約 5%大きかった。これは、試験体の有効高さが、剛性の推定に用いた高さよりも若干短かったためと考えられる。よって、柱の上下のボルト接合部の距離を用いると、フレームの初期固有周期は 0.1 秒と推定でき、これは自由振動試験や地震動の入力で測定された周期と同じであった。以上より、約 1.5 mm の層間変形で短柱が降伏すると仮定して、バイリニア解析的性能曲線を作成した（図 3.1.1-2）。

表 3.1.1-1　SDOF*試験体の特性

アルミのヤング係数	Ea	69,000,000 N/mm^2
アルミの降伏応力	Fy	170,000 N/mm^2
柱面積	Ac	30 mm×2 mm　（小さい方が振動方向）
長柱の高さ	Hl	170 mm
短柱の高さ	Hs	65 mm
質量	M	20 kg
推定初期剛性	Kc	73.8 N/mm
測定初期剛性	Km	78.5 N/mm
推定固有周期	Tc	0.10 s
測定固有周期	Tm	0.10 s

＊SDOF：Single Degree Of Freedom（1 自由度）

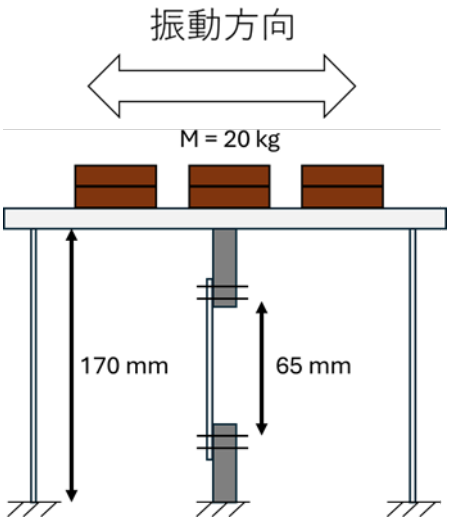


図 3. 1. 1-1　SDOF 試験体の立面図

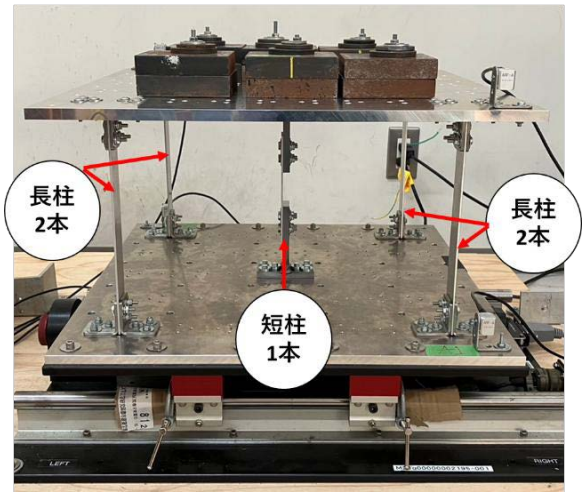


写真 3. 1. 1-1　SDOF 試験体の立面写真

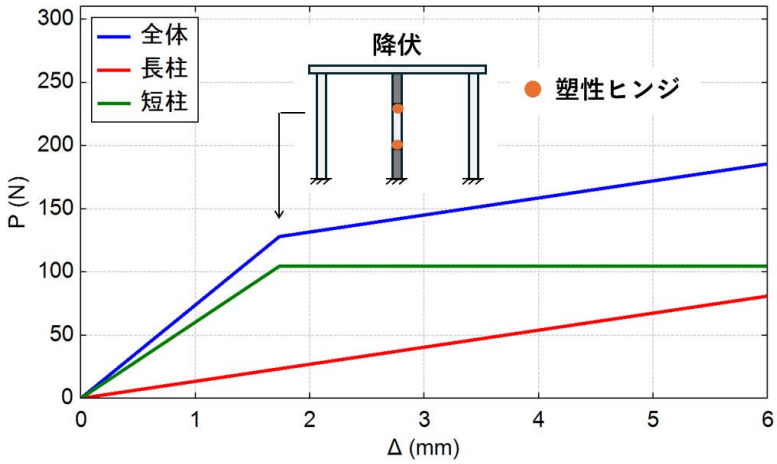


図 3. 1. 1-2　解析性能曲線

2）実験結果

試験体には、1940 El Centro 記録の NS（North-South：南北）成分を持つ一連の地震動を入力した。その結果を表3.1.1-2に示す。観測記録による性能曲線に基づくと、PGA（Peak Ground Acceleration：最大地動加速度）が 0.3 g の時に短柱は降伏し（図3.1.1-3）、その時、変位 Sd は 2.2 mm、柱の歪は 2,300 μ ε に達した。最大の地震動（PGA が 0.8 g）を入力した時には、試験体は変位 5.4 mm に達し、塑性率はおよそ 2.5 となった。実験は振動台とレーザーセンサーの加力・測定限界に達したところで終了した。

図 3.1.1-4 に、減衰係数を 0.5%とした応答スペクトルと各 Run で測定された固有周期を用いて求めた推定変位 Sd、測定変位 Sd の比較を示す。推定変位 Sd は、2 mm を超える変位で測定変位 Sd を超える傾向が見られ、このことから、降伏後の減衰が塑性率とともに 0.5%から徐々に増加した可能性があることが分かる。

表 3.1.1-2　SDOF 実験結果（1/2）

TC	PGA（g）	PGD（mm）	Sa（g）	Sd（mm）	Fourier T (sec)
2.0	0.06	3.9	0.24	0.6	0.102
2.0	0.06	3.9	0.24	0.6	0.102
2.0	0.12	7.6	0.41	1.0	0.102
2.0	0.12	7.6	0.41	1.0	0.101
2.0	0.16	11.4	0.59	1.4	0.098
2.0	0.17	11.4	0.59	1.4	0.100
2.0	0.21	15.3	0.70	1.7	0.102
2.0	0.22	15.3	0.71	1.7	0.100
2.0	0.25	16.9	0.80	1.9	0.101
2.0	0.25	17.2	0.78	1.9	0.101
2.0	0.28	19.0	0.86	2.1	0.100
2.0	0.30	20.9	0.90	2.2	0.104
2.0	0.31	20.9	0.96	2.2	0.105
2.0	0.33	22.8	1.07	2.6	0.101
2.0	0.35	24.7	1.20	3.1	0.105
2.0	0.36	26.9	1.40	3.8	0.108
2.0	0.34	29.0	1.20	3.3	0.113
2.0	0.34	29.0	1.14	3.2	0.112
2.0	0.37	31.0	1.22	3.3	0.109
2.7	0.41	17.5	1.31	3.8	0.109
2.7	0.44	18.5	1.37	4.1	0.109
2.7	0.46	19.6	1.41	4.3	0.112
2.7	0.48	20.7	1.46	4.4	0.109
2.7	0.50	21.7	1.51	4.6	0.108
2.7	0.52	22.8	1.54	4.8	0.114
2.7	0.54	23.9	1.60	5.1	0.115
2.7	0.56	24.9	1.60	5.3	0.111
2.7	0.58	26.0	1.61	5.4	0.114

表 3.1.1-2　SDOF 実験結果（2/2）

TC	PGA（g）	PGD（mm）	Sa（g）	Sd（mm）	Fourier T (sec)
3.5	0.49	15.3	1.39	4.3	0.116
3.5	0.52	16.5	1.49	4.5	0.115
3.5	0.55	17.8	1.57	4.8	0.115
3.5	0.62	20.4	1.71	5.4	0.116

＊TC：時間縮約係数
PGA：最大地動加速度
PGD：最大地動変位
Sa：１階の最大応答加速度（絶対値）
Sd：１階の最大応答変位（絶対値）

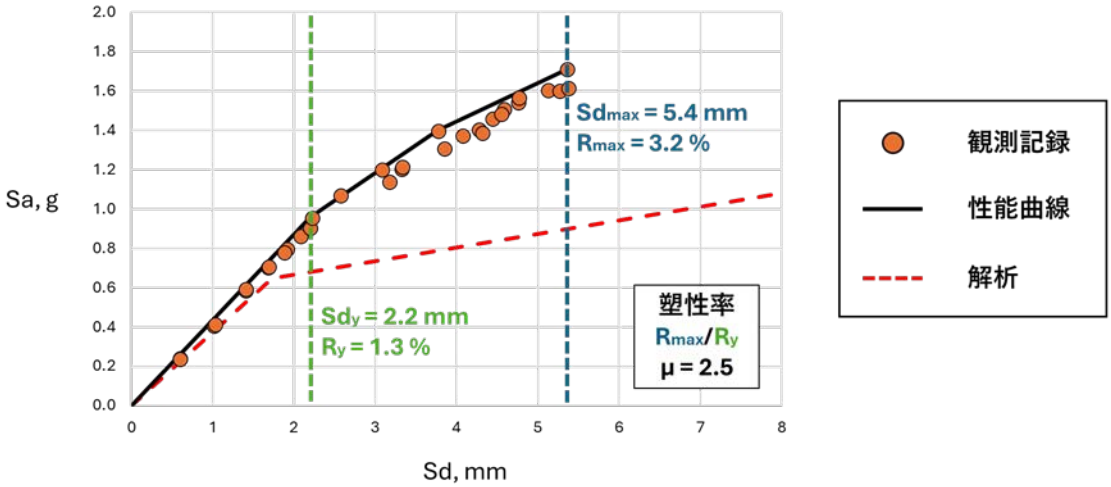


図 3.1.1-3　性能曲線

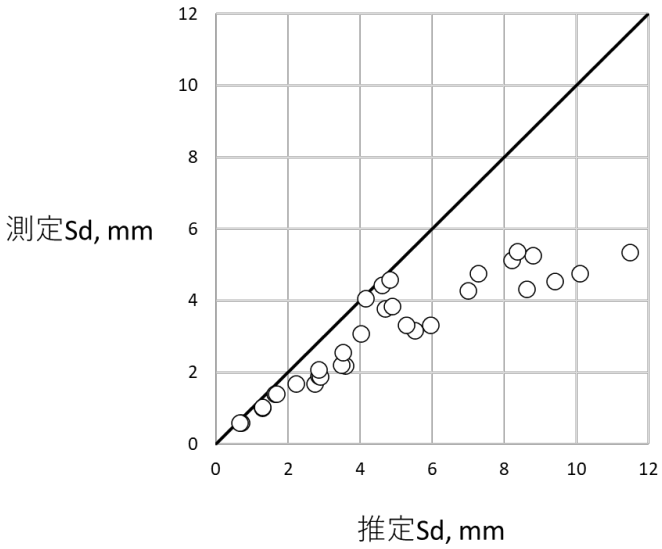


図 3.1.1-4　応答変位（変形性状）の推定精度

③ 多自由度（多質点）系－剛性低下階の推定方法

目視での調査を行わずに建物の損傷程度を推定するために、建物内の限られた層に設置した加速度計の観測記録より、地震発生後の建物の各階の構造分布を正しく評価する方法について検討を行った。

建物の損傷を評価し、将来の地震による応答を正しく推定するためには、損傷の有無や位置（層）を把握することが重要である。そこで、RC 造建物の損傷に大きな影響を与える剛性低下に着目し、図 3.1.1-5、図 3.1.1-6 に示すように、建物内に設置した加速度計の観測記録より建物の固有周期を求め、求めた固有周期に基づき各階の剛性分布の推定を行う。

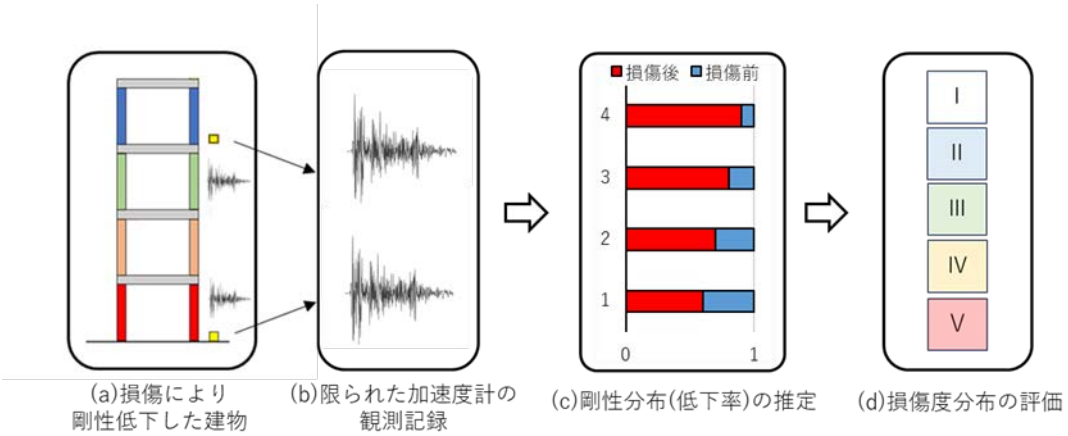


図 3.1.1-5　剛性分布の推定の概要

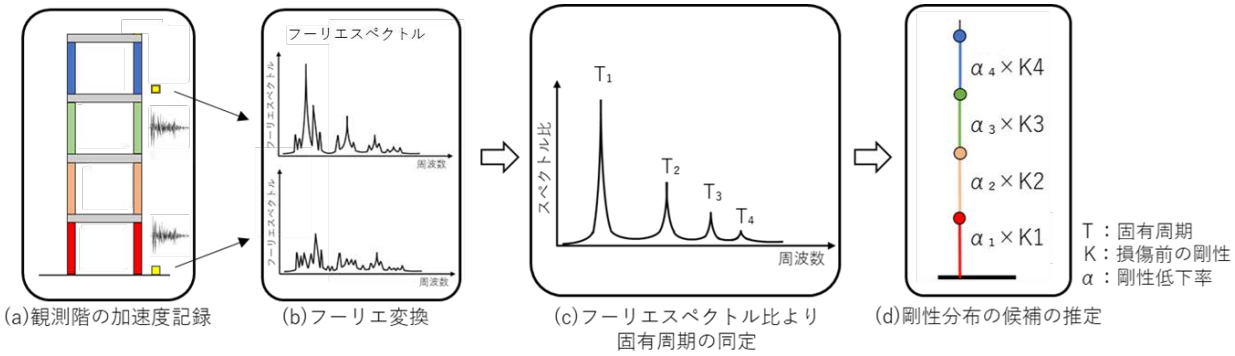


図 3.1.1-6　各階剛性分布の推定

提案するのは、図 3.1.1-6 に示すように、建物内に設置した加速度計の観測記録より建物の固有周期を求め、求めた固有周期に基づき各階の剛性分布を推定する方法である。ここでは、設置できる加速度計は最小の 2 個（基礎と他 1 層）に限られている場合とする。以下、推定法の流れを示す。

1）固有周期の抽出

地震発生時の基礎と他 1 層の加速度記録をフーリエ変換し、それらのフーリエスペクトル比により各次の固有周期を同定する。地震発生ごとにこれを行うことで、固有周期の変化からいずれかの層に損傷による剛性低下が発生したことが推定できる。

2）剛性分布の推定

建物の損傷前の各階の剛性（設計時の剛性）に対する剛性低下率をα_n（n：階数）とし、1)で求めた各次の固有周期と、剛性低下率α_nを用いて計算する各次周期の誤差の 2 乗和の合計が最小となるような剛性低下率の組み合わせを求めることで、剛性分布の推定を行う。ここで使用する誤差の求め方は式(3.1.1-1)に示す。

$$\text{周期 T の誤差} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\text{計算}T_i - \text{観測}T_i)^2} \qquad \text{式(3.1.1-1)}$$

n：建物の階数

④　多自由度（多質点）系（2DOF）－線形応答の実験と推定方法の検証

1)試験体の説明

線形応答域の実験に用いた 2 層の試験体は、表 3.1.1-3 に示す特性のアルミフレームである。立面図を写真 3.1.1-2 に示す。各モードの固有周期を用いた各階剛性分布の推定方法を実験的に検証するために、試験体の 1 階と 2 階の柱量を 4 本から 10 本の間で変化させた 10 通りで実験を行った。各ケースの概要は表 3.1.1-4 に示す。1 階と 2 階のスラブ上部には 10 kg の質量を取り付けた。

表 3.1.1-3　2DOF 試験体の特性

アルミのヤング係数	Ea	69,000,000 N/mm^2
柱面積	Ac	30 mm×2 mm　（小さい方が振動方向）
長柱の高さ	Hl	140 mm
推定初期剛性	Kc	60.3 N/mm
質量	M	10 kg

表 3.1.1-4　2DOF 試験体各階ごとの柱の数

ケース	1 階柱の数	2 階柱の数
1	10	10
2	8	10
3	6	10
4	4	10
5	10	8
6	10	6
7	10	4
8	8	8
9	6	6
10	4	4

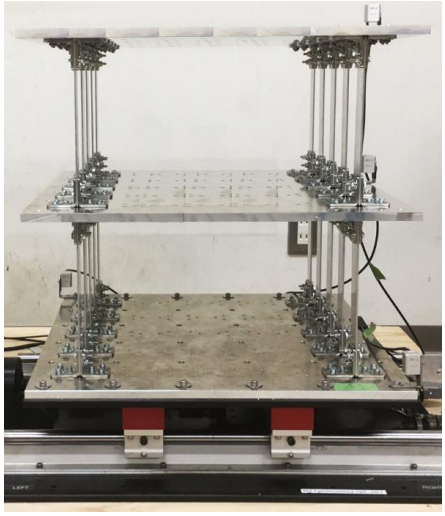


写真 3.1.1-2　2DOF 試験体の立面写真

2)実験結果

③で述べた剛性低下階の推定手法を実験に適用した結果を以下に示す。表 3.1.1-5 と図 3.1.1-7 は、1 次・2 次固有周期の計算結果と測定結果を示している。どちらのモードも推定値と測定値は良く一致しており、誤差は平均 5%未満である (表 3.1.1-6)。

表 3.1.1-5　計算と観測周期の比較

Case	計算 1 次周期 (秒)	計算 2 次周期 (秒)	観測 1 次周期 (秒)	観測 2 次周期 (秒)
1	0.131	0.050	0.134	0.048
2	0.142	0.051	0.150	0.049
3	0.160	0.053	0.167	0.050
4	0.191	0.054	0.204	0.052
5	0.135	0.054	0.134	0.051
6	0.143	0.059	0.140	0.056
7	0.159	0.065	0.156	0.063
8	0.146	0.056	0.155	0.054
9	0.169	0.065	0.172	0.061
10	0.207	0.079	0.218	0.077

表 3.1.1-6　周期の精度

	1 次モード 観測/計算	2 次モード 観測/計算
Avg	1.03	0.95
Std Dev	0.03	0.01
COV	0.03	0.01

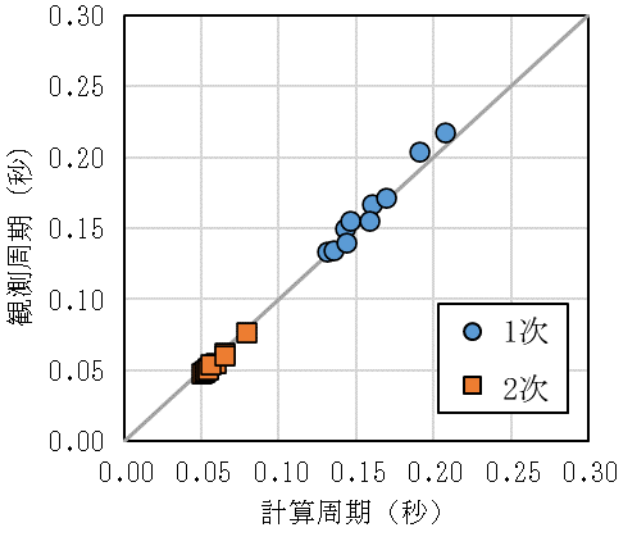


図 3.1.1-7　周期の比較

以上の周期を剛性分布を推定するために使用すると、推定結果には周期と比較してより誤差があることが分かった（表 3.1.1-7、図 3.1.1-8）。剛性分布の推定精度は固有周期の推定精度よりも低いとは言え、結果は測定値の 15%以内の誤差を示しており、多自由度系の損傷（剛性低下）分布の推定に関する提案手法の信頼性を示唆している（表 3.1.1-8）。

表 3.1.1-7　観測と予測剛性の比較

観測α_1 1 階剛性	観測α_2 2 階剛性	予測α_1 1 階剛性	予測α_2 2 階剛性
1	1	0.95	1
0.8	1	0.71	1
0.6	1	0.54	1
0.4	1	0.34	1
1	0.8	0.94	0.98
1	0.6	0.92	0.77
1	0.4	0.78	0.57
0.8	0.8	0.66	0.91
0.6	0.6	0.54	0.73
0.4	0.4	0.33	0.47

表 3.1.1-8　推定した剛性分布の精度

	1 階剛性 観測/計算	2 階剛性 観測/計算
Avg	1.14	0.88
Std Dev	0.07	0.11
COV	0.07	0.12

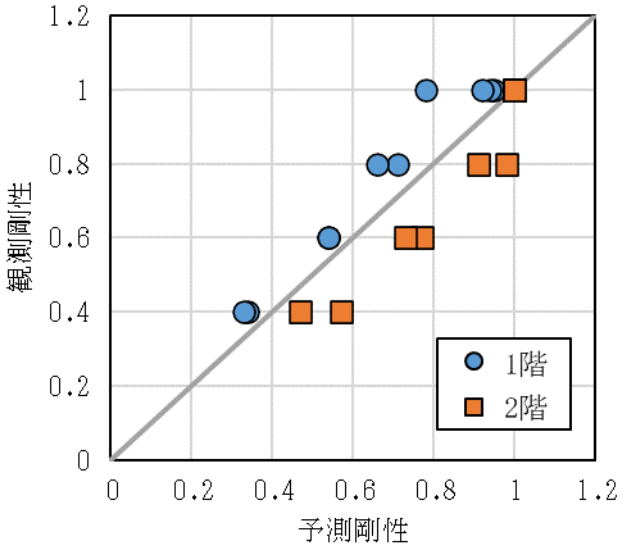


図 3. 1. 1-8　剛性の比較

(2) 解析モデルと観測記録に基づくモニタリングシステムの開発

① 評価法の概要

建物内に設置した加速度計の観測記録と構造解析モデルによる復元力特性を用いて、動的応答・振動性状を評価することで、目視での調査を行わずに建物の被災度を判定すること、さらに将来の地震による建物の応答を推定し構造健全性を評価する方法（モニタリングシステム）を検討した。

一般に、構造設計で用いる建物の解析モデルによる復元力特性（以下、性能曲線という。）は、材料強度や設計式の余裕度、経年変化や地震被害による性能低下などから、実際の性能曲線に対して誤差を有している。そこで、図 3. 1. 1-9 に示すように、まず①観測応答に基づき、解析モデルの性能曲線の補正をする。次に、②観測応答より求めた等価粘性減衰定数に基づき、解析モデルの減衰の補正を行う。③特性点による被災度の区分を行い、最終的には④補正した性能曲線と等価粘性減衰定数に基づき将来の地震に対する応答・被災度の推定を行う。

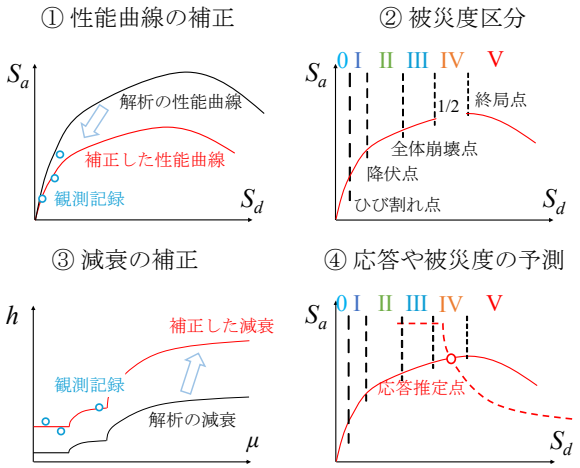


図 3. 1. 1-9　性能曲線の補正と応答評価の概念図

② 性能曲線の更新手法

本研究では、観測データを用いて限られた数のセンサで建屋の応答と振動特性を推定する方法を検討し、建物を等価 1 自由度系に縮約した性能曲線について、3 種類の補正方法を提案した。1 つ目は解析モデルに基づく性能曲線を一律の係数により拡大・縮小する方法（以下、係数倍法という。）、2 つ目は、損傷のある建物について初期剛性を 2 次曲線により補正する方法、3 つ目はひび割れ点・降伏点などの特性点を抽出してそれぞれ補正する方法（特性点フィッティング法）である。

性能曲線の補正の際には、構造ヘルスモニタリングの観点から、建物が経験した限られた観測記録に基づいて未経験領域である大地震時の応答を精度良く推定できることが目標である。このため、推定精度を検証できるように、補正に使用する観測記録の範囲を弾性範囲から塑性範囲まで変化させ、それぞれの手法の妥当性を検討した。

1）係数倍法

係数倍法では、図 3.1.1-10 に示すような、解析モデルによる性能曲線を一律の係数により拡大・縮小する 2 種類の方法を考える。本手法では、「建物の実際の性能曲線は解析モデルによる性能曲線と概ね相似形であり、縦横方向に拡縮した形で与えられる」ことを前提としている。最大応答加速度 Sa 及び最大応答変位 Sd の補正係数をそれぞれ α、β とし、観測曲線と解析曲線の平均誤差が小さくなる組み合わせを考える。図 3.1.1-11 に示すように、観測曲線と解析曲線の誤差はこれらの最短距離 δi とし、各観測点における δi の 2 乗和を平均して、式(3.1.1-2)により平均誤差 Δ を求めた。なお、計算の際には、Sa、Sd ともに観測値の最大値で基準化することとした。観測曲線と解析曲線の平均誤差 Δ が最小となる係数 α、β で補正を行う最適補正法、平均誤差 Δ が小さくなる係数 α、β の組み合わせのうち上位数%を平均した補正係数を用いて補正を行う平均補正法の 2 種類の補正を行った。

なお、本手法では解析モデルによる曲線を一律に拡大・縮小するため、本手法は設計時の想定が実際の建物の挙動と比較的近い場合に効果的であるが、例えば解析と実際の崩壊形に相違がある場合には、精度が著しく劣る可能性を有している。

$$\text{平均誤差}\quad \Delta = \sqrt{\frac{\Sigma\delta^2}{n}} \qquad \text{式（3.1.1-2）}$$

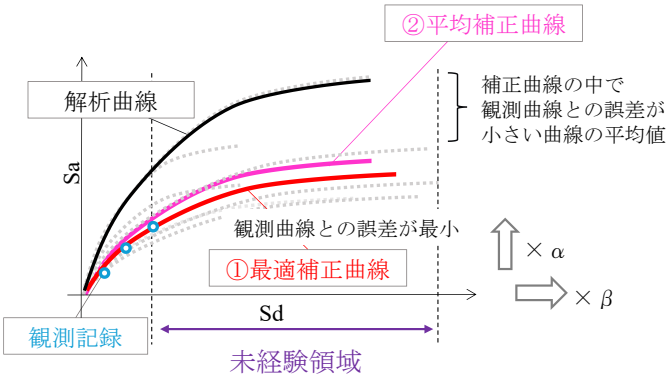


図 3.1.1-10　係数倍法の概要

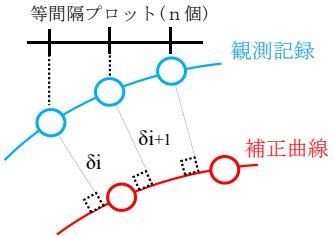


図 3.1.1-11　誤差の求め方

2）2 次曲線フィッティング法

建物が損傷を受けると、降伏剛性と比較して初期剛性が著しく低下することがある。よって、図 3.1.1-12 に示すように、解析モデルと同等の耐力となるまで 2 次曲線により性能曲線を補正することで、係数倍法と比較して初期剛性を必要以上に低く見積もることがなく、より正確な性能曲線を得ることができると考えられる。

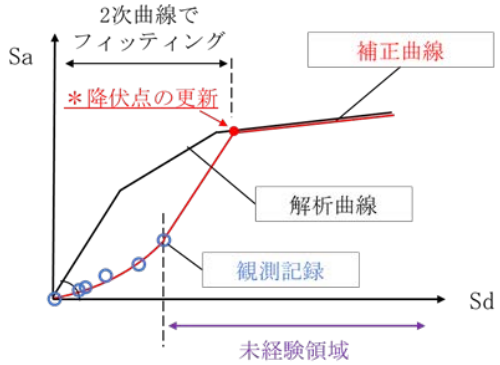


図 3.1.1-12　2 次曲線フィッティング法の概念図

3）特性点フィッティング法

特性点フィッティング法では、性能曲線上で剛性や耐力が低下するひび割れ点、降伏点、終局点などの構造性能の特性点を同定し、それらを基準に解析モデルの曲線を補正する。具体的には、以下の手順で修正を行う。

(a) 観測記録の性能曲線のスムージング

応答観測による応答点を結んだ性能曲線は、観測記録のばらつきなどから細かい折れ線になる。これを滑らかな曲線にするために、カルマンフィルタリング法を用いてスムージングを行う（図 3.1.1-13①緑線：以下、カルマン曲線という。）。

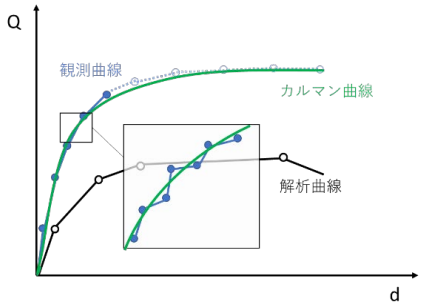
(b) 特性点の定義

構造性能の特性点として、(1)ひび割れ点、(2)降伏点（いずれかの部材が最初に降伏する点）、(3)全体崩壊メカニズム形成点（部材が降伏し架構として崩壊メカニズムを形成する点）、(4)終局点（架構の水平耐力が低下し始める点）の 4 つを取り上げることとする。これらの点では、架構全体（等価 1 自由度系）の性能曲線において、剛性（K）が急激に変化すると考えられる。カルマン曲線の瞬間剛性の変化率（絶対値）（R_k）のイメージを図 3.1.1-13②右に示す。ひび割れ・降伏などで剛性が急激に低下する点では、図 3.1.1-13②のように剛性変化率は上に凸になる。よって本研究では、それらを特性点として定義することとする。

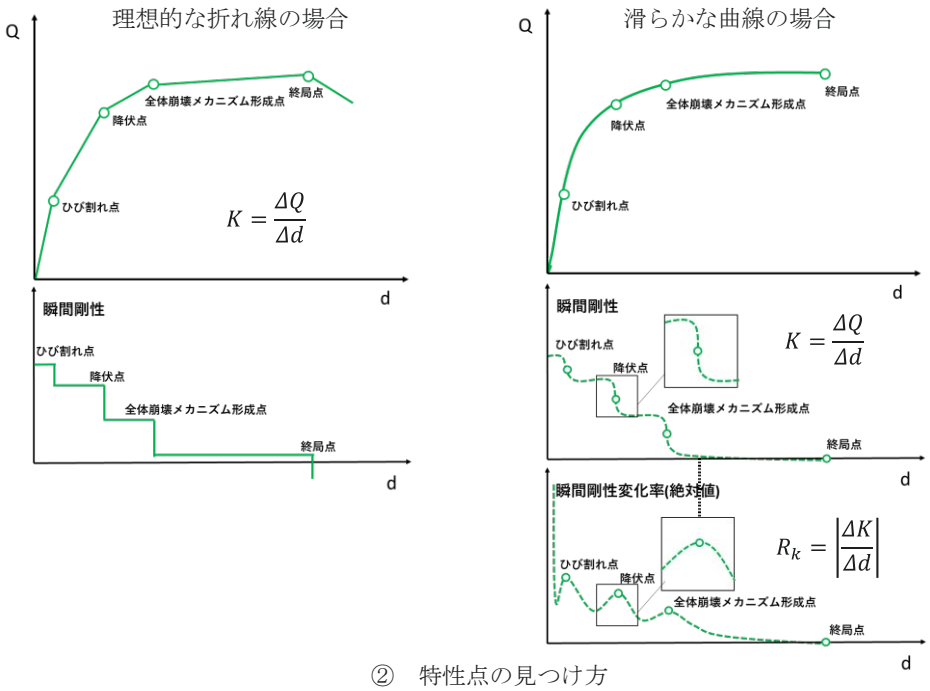
(c) 解析曲線の補正

解析モデルの性能曲線の特性点とカルマン曲線の特性点を比較し、それらの拡幅率αi、βi（i＝1～4）を求め、得られたαi、βi を用いて解析曲線を係数倍し補正する（図 3.1.1-13③左側）。限られた観測記録のみを使用する場合には、特性点をすべて同定することができないため、図 3.1.1-13③右側に示すように、未経験領域については、最大特性点と同様の拡幅率を使用して補正を行う。

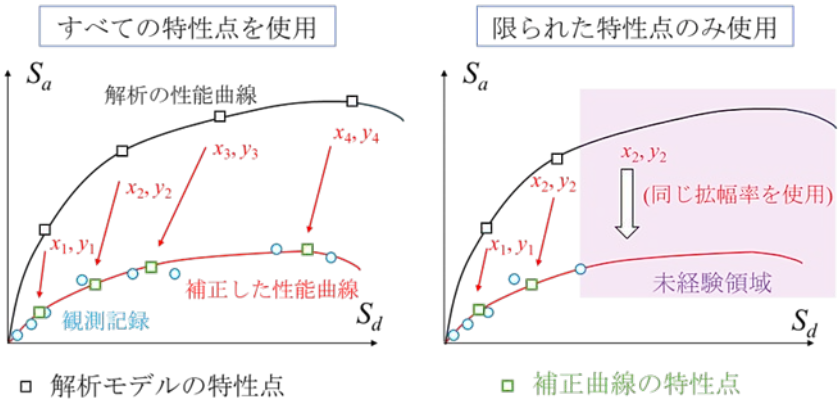
この補正方法においては係数倍法とは異なり、補正曲線の形が解析曲線から変化するため、解析による性能曲線の形が実際の建物の性能曲線と多少異なる場合においても効果的であると考えられる。



① 観測記録の復元力曲線のスムージング



② 特性点の見つけ方



③ 解析の性能曲線の補正

図 3.1.1-13　特性点フィッティング法の概念図

③ 減衰の更新手法

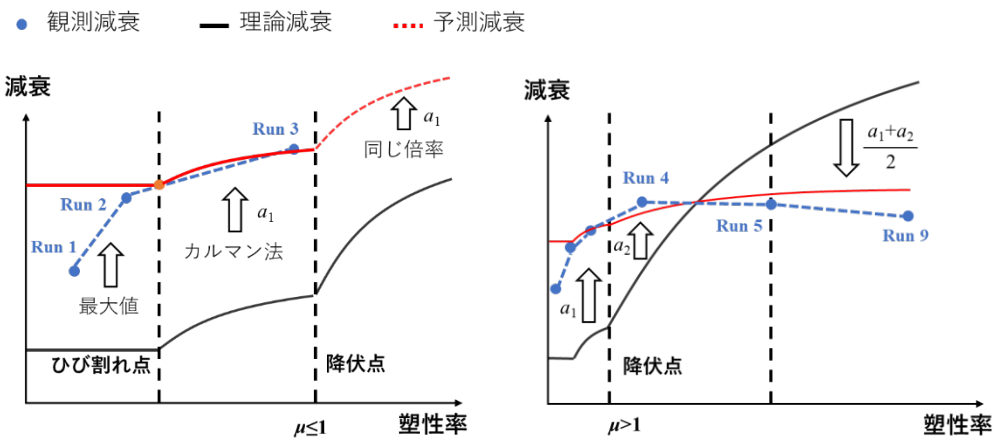
武田モデルの履歴ループの面積に基づく等価粘性減衰定数の理論式に対して観測記録の応答での減衰により補正を行う。補正方法の概念を図 3.1.1-14 に示す。

1） 弾性範囲のみの観測記録で塑性範囲における減衰を予測する場合

ひび割れが発生する前は、観測値の最大減衰と等しい値で一定とし、ひび割れ発生後は降伏点までカルマンフィルタリング法を用いて減衰を更新する。塑性範囲については弾性範囲で使用した補正倍率と同じ値を用いて告示式を補正することで減衰の予測を行う。

2） 塑性範囲の観測記録も使用してその後の減衰を予測する場合

観測されたひび割れ点、降伏点における塑性率と減衰の値を使用する。降伏後については塑性範囲の観測値のみを考慮し、新たな増幅率を計算する。降伏前と降伏後の増幅率の平均値をカルマンフィッティング法で計算し、告示式の塑性範囲のモデルを補正する。



1）弾性範囲のみの観測記録を使用する場合　2）塑性範囲の観測記録も使用する場合

図 3.1.1-14　等価粘性減衰定数の補正方法

④ 被災度の区分の手法

性能曲線に基づく被災度区分判定法として、特性点に基づき被災度を評価する方法を提案する。特性点においては、建物のひび割れや降伏による耐力低下などから構造性能が変化するため、これらの点が被災度の進展にも直接対応すると考えられる。(図 3.1.1-15)。本手法では、ひび割れが発生する前を無損傷（被災度 0）とし、ひび割れが発生した後、降伏までの間を軽微（被災度Ⅰ）とする。降伏後、全体崩壊メカニズムが形成されるまでを小破（被災度Ⅱ）、その後終局点までの間を中破から大破（被災度Ⅲ-Ⅳ）とし、終局点以降を崩壊（被災度Ⅴ）と評価することとする。

性能曲線がトリリニアモデルのような折れ線であれば剛性低下点も明確であるが、複数の部材から構成される架構の場合は、順次ひび割れや降伏が生じ緩やかに剛性が低下するため、特性点を同定することが難しい。よって、図 3.1.1-13②の方法より、瞬間剛性の変化率を利用して特性点を検出する方法を考える。

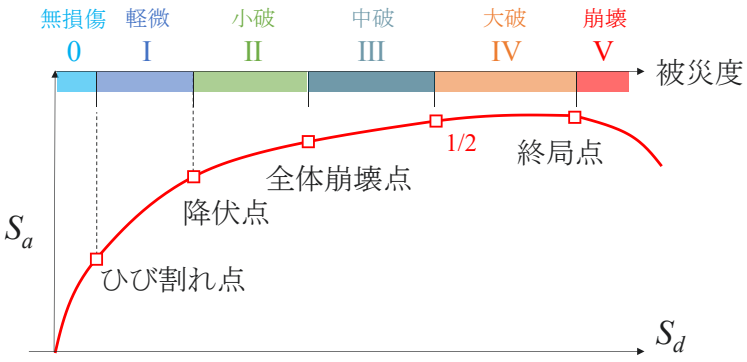


図 3. 1. 1-15　特性点に基づく被災度の区分手法

⑤ 将来の地震に対応する応答の予測や被災度の同定手法

②において補正した性能曲線と③において補正した等価粘性減衰定数を用いて、応答スペクトル法により将来の地震動による応答推定を行う。また、予測した応答に対して④の被災度区分手法を用いることで、建物の被災度を予測する。以上の通り、モニタリングシステムを開発した（図 3. 1. 1-16）。

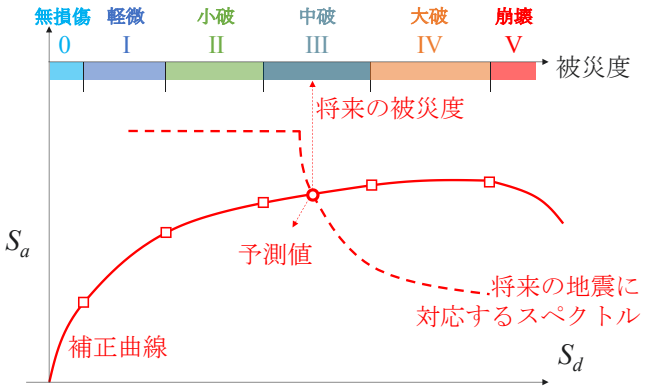


図 3. 1. 1-16　応答予測と被災度の同定手法

3.1.2　長期変形性状の観測及び評価（再委託先：東京工業大学）【令和 3 年度～令和 5 年度】

(1) 建物の挙動の算出方法の開発

【令和 4 年度までの概要】

令和 3 年度には、測定に用いる加速度センサとジャイロセンサの測定精度確認のため、傾斜装置兼振動装置を作製し、静止時と振動時のいずれにおいても、巨視的には十分な精度を有していることを確認した。

令和 4 年度には、RC 壁試験体の静的加力実験と振動実験を行い、加速度センサとジャイロセンサによる壁の面外変形の測定を試みた。測定方法は、鉛直方向に設置した 4 箇所のセンサの傾斜角とたわみ曲線を同定して壁頭変位を算定する方法を採用した。その結果、振動時の最大変位はジャイロセンサで、振動後の残留変位は加速度センサで変形を測定することが有効であることが示された。

【令和 5 年度実施内容及び成果】

令和 5 年度は、部材実験の結果を基に、建物に配置したセンサから建物の挙動を算出する方法を開発した。

また、FEM による数値解析により、センサの最適配置を検討するシステムを開発した。FE モデルは、シェル要素等を用いた簡易なものとした。数値解析により、想定したセンサの設置位置での回転角を振動時及び静止時で計算し、それらの結果から建物の変形を算定し、視覚的にアウトプットした。

① 目的は、振動時の変形を精度良く測定できる積分方法を開発することと、部材変形の測定方法を建物の変形測定に拡張する方法を提案することである。

② RC 壁試験体の振動実験は、変形測定方法の精度を検証するために行った。令和 4 年度と同一仕様の RC 壁試験体 2 体（試験体 No. 3 と No. 4）を作製し、1 体はねじれ振動を生じるような加振を行い、もう 1 体は観測地震波を入力した時の測定精度を確認した。

試験体 No. 3 と No. 4 は、令和 4 年度の試験体と同一設計で、材料の機械的性質は、D6 異形鉄筋の耐力（0.2%オフセット法）は 381 N/mm^2、コンクリートのシリンダー圧縮強度は 32.1 N/mm^2 である。加振方法と変位測定方法は令和 4 年度と同様で、図 3.1.2-1 に示すように、ピンローラー支承に試験体を載せ、アクチュエーター治具に試験体を固定し、壁頂部に錘を取り付けて加振した。試験体の変位は、スタブと壁頭で変位計を用いて測定した。

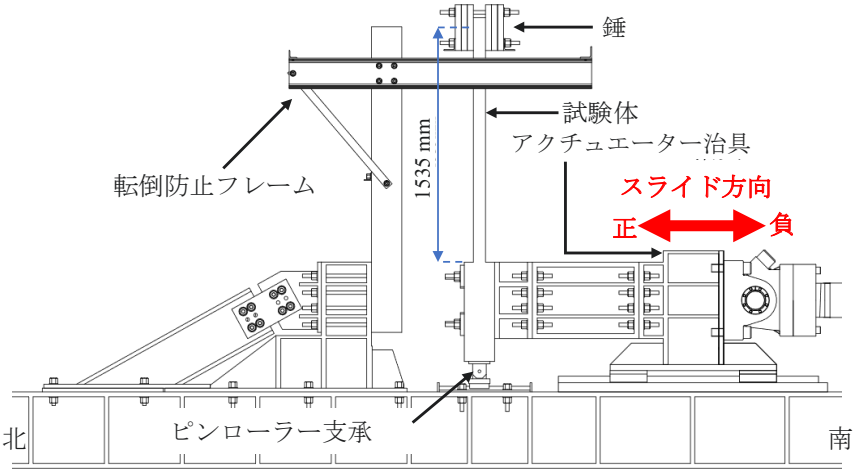


図 3.1.2-1　振動実験装置図（試験体 No. 4）

試験体 No. 3 は、錘を東側に偏らせ、さらにスタブを西側のみ PC(Prestressed Concrete Steelbar：プレストレスト・コンクリート鋼棒）鋼棒で固定して東側はアクチュエーター治具との間にギャップを設け、ねじりを生じるようなセッティングを行い、正弦波を入力して加振した。表 3.1.2-1 は加振計画と加振結果であり、入力した正弦波の振幅、振動数、波数ならびに壁頭の最大応答変位（正負の方向で絶対値の大きい方の値）と加振後の固有周期を示している。アクチュエーターの不具合で制御が不十分となり、加振 No. 4 で大きく変形して軸方向鉄筋が壁脚で降伏した。その後、鉄筋が降伏した壁脚での面内回転（東西軸まわりの回転）が支配的となった。図 3.1.2-2 は、ねじれ振動（鉛直軸まわりの回転）の最も大きかった加振 No. 7 の結果であり、試験体の東西 2 箇所で変位計を用いて測定した壁頭相対変位の時刻歴応答（スタブの変位に対する壁頭変位の応答）を示している。ねじれを生じると東西の変位に差を生じるが、図 3.1.2-2 に示すように、大きなねじれを生じるような結果は得られず、アクチュエーターの制御に不具合も生じたため、加振 No. 14 で終了した。なお、表 3.1.2-1 で加振 9～11 と加振 12～14 は、ひび割れがほとんど進展しなかったため連続して加振した後に固有周期の測定を行った。

表 3.1.2-1　試験体 No. 3 の正弦波加振と加振結果

加振 No.	振幅	振動数	正弦波数	壁頭の最大応答変位	固有周期*
1	5 mm	2 Hz	3 波	-0.02 mm	0.19 sec
2	5 mm	2 Hz	6 波	-1.70 mm	0.19 sec
3	10 mm	2 Hz	3 波	-3.63 mm	0.26 sec
4	10 mm	3 Hz	3 波	-26.77 mm	0.29 sec
5	15 mm	0.5 Hz	3 波	-6.35 mm	0.77 sec
6	10 mm	2 Hz	3 波	31.76 mm	0.87 sec
7	10 mm	2 Hz	3 波	38.83 mm	0.98 sec
8	15 mm	2 Hz	3 波	45.25 mm	1.00 sec
9	20 mm	1.5 Hz	1 波	42.67 mm	
10	25 mm	2 Hz	1 波	-36.83 mm	
11	20 mm	1 Hz	3 波	32.42 mm	1.03 sec
12	8 mm	1 Hz	6 波	33.57 mm	
13	5 mm	1.3 Hz	6 波	25.53 mm	
14	30 mm	1 Hz	3 波	30.71 mm	0.95 sec

＊ 加振後のスイープ波入力で得られた固有周期。加振 No. 1 前は 0.18 sec。

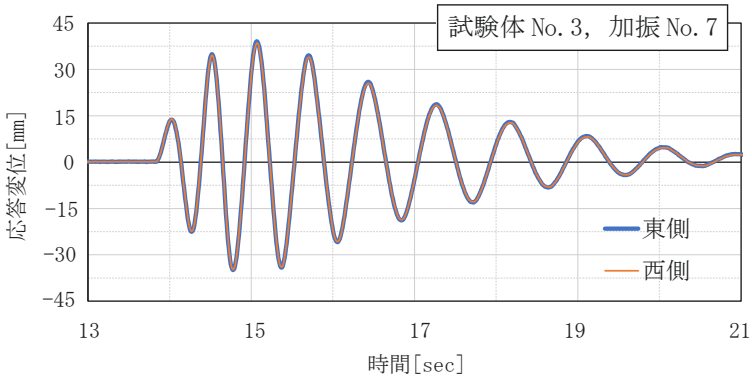


図 3.1.2-2　変位計で測定した壁頭の時刻歴応答変位（試験体 No. 3、加振 No. 7）

試験体 No.4 は、令和 4 年度の試験体 No.2 と同じセッティングを行い、観測地震波を基準化した波を入力した。観測地震波には 1995 年兵庫県南部地震の JMA KOBE 波（南北方向）[3.1.2-1]の加速度データを用いた。アクチュエーターの容量を考慮して震動開始から 10 秒間程度を抜き取り、基線補正後に積分して得られた変位時刻歴波形を入力波とした。図 3.1.2-3 に最大速度を 50 kine に基準化した入力波を示す。加振は、最大速度を 10～40 kine に基準化して入力した。表 3.1.2-2 は、加振計画と加振結果であり、入力した地震波の最大速度、壁頭の最大応答変位と残留変位（いずれも正負の方向で絶対値の大きい方の値）及び加振後の固有周期を示している。図 3.1.2-4 は、軸方向鉄筋が壁脚で初めて降伏した加振 No.5 の結果であり、試験体の東西 2 箇所で変位計を用いて測定した壁頭相対変位の時刻歴応答（スタブの変位に対する壁頭変位の応答）を示している。この加振は入力最大速度 30 kine の 2 回目であり、大きく変形して残留変形も 3 mm を超えた。その後、入力最大速度が 40 kine と 30 kine の加振を行い、最大応答変位が 95 mm を超えて測定装置の限界に近付いたため、加振を終了した。

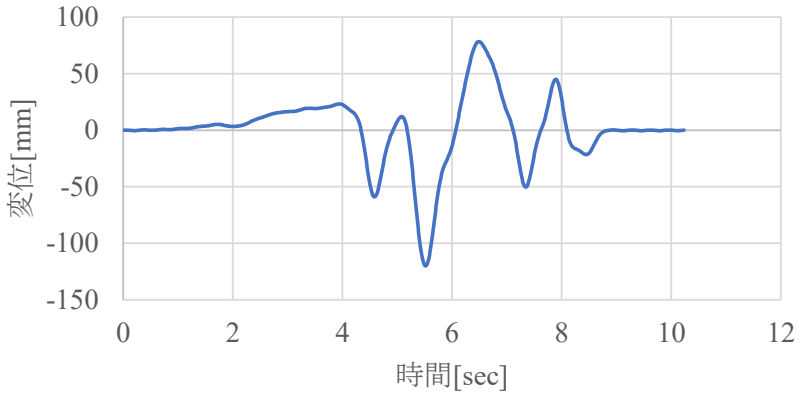


図 3.1.2-3　試験体 No.4 の入力変位波（最大速度 50 kine）

表 3.1.2-2　試験体 No.4 の地震波加振と加振結果

加振 No.	入力最大速度	壁頭の最大応答変位	壁頭の残留変位	固有周期*
1	5 kine	-0.59 mm	0.05 mm	0.19 sec
2	10 kine	-1.07 mm	0.07 mm	0.19 sec
3	20 kine	-2.13 mm	-0.04 mm	0.20 sec
4	30 kine	-5.58 mm	-0.10 mm	0.33 sec
5	30 kine	-25.33 mm	-3.04 mm	0.69 sec
6	40 kine	-66.45 mm	-15.51 mm	1.03 sec
7	30 kine	-95.15 mm	-42.36 mm	0.93 sec

＊ 加振後のスイープ波入力で得られた固有周期。加振 No.1 前は 0.19 sec。

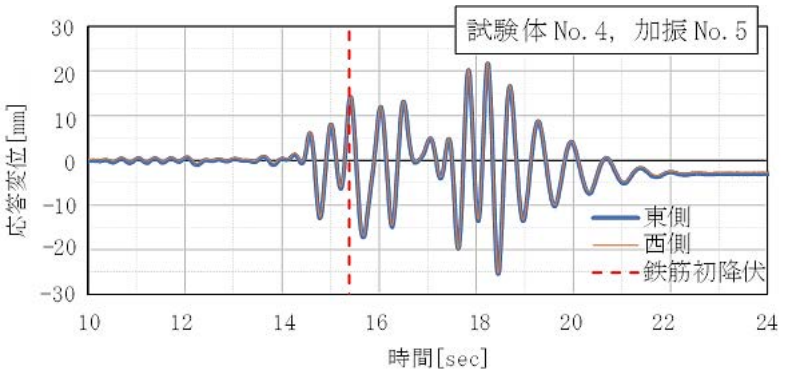


図 3.1.2-4　変位計で測定した壁頭の時刻歴応答変位（試験体 No. 4、加振 No. 5）

③ ジャイロセンサで測定された角速度から回転角を算出するには 1 階積分する必要がある。令和 4 年度は低周波成分をカットして基線補正しただけの角速度を積分したため、残留変位まで算出できなかった。令和 5 年度は積分方法を改良する。

ジャイロセンサで測定した角速度データから回転角を算出する積分方法を図 3.1.2-5 に示す。（ⅰ）では角速度の時刻歴データを加振前・加振中・加振後の 3 区間に分割している。今回は、0.2 Hz 以下と 30 Hz 以上をカットした角速度データを用い、加振前区間の最初の 3 秒間のデータから平均値 μ と標準偏差 σ を求め、$\mu \pm 5\sigma$ を最初に超えた時間から最後に超えた時間までを加振中、その前後の時間をそれぞれ加振前と加振後とした。（ⅱ）では補正に用いる基線を算出している。加振前と加振後は角速度データの平均値、加振中の前後区間を線形補間した。つまり、角速度基線の時刻歴は加振前と加振後は水平線で加振中は 1 次関数となる 3 折れ線の基線となる。（ⅲ）では、得られた基線でバンドパスフィルタ処理していない元の角速度データを補正する。これは、低周波成分を含めなければ残留変位が算出できないためである。（ⅳ）では基線補正された角速度データを 1 階積分する。今回は台形公式で積分した。

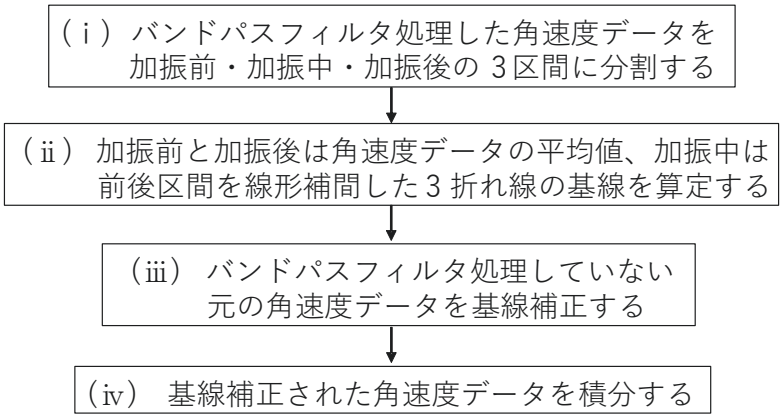
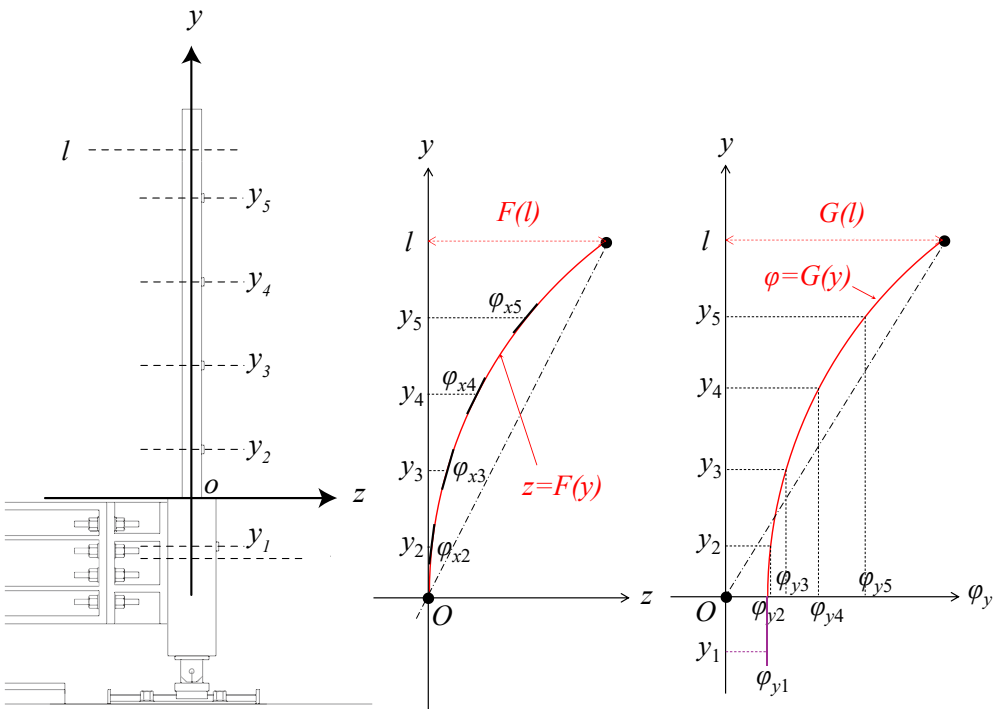


図 3.1.2-5　ジャイロセンサの測定値から回転角を算出する積分方法

④ ジャイロセンサの測定値から算出した回転角を用い、令和 4 年度の方法と同様に、たわみとねじれの変形曲線とセンサ回転角を同定して壁頭の水平変位とねじれ角を算出する。図 3.1.2-6 はセンサの測定値と変形曲線の同定方法を示しており、図 3.1.2-6(a) に示すように高さ方向を y 軸、加振方向の南北方向を z 軸、東西方向を x 軸としてい

る。センサは y_1～y_5 の高さに設置しており、壁頭高さ l での変位を算出する。図 3.1.2-6(b)に示すように水平変位は 4 次のたわみ曲線と各センサの x 軸まわり回転角を同定する。ねじれについては、ねじれ角の 4 次曲線と各センサの y 軸まわり回転角を同定する。



(a)センサの設置位置　(b)たわみ曲線　(c)ねじれ角の曲線

図 3.1.2-6　センサの測定値と変形曲線の同定方法

試験体 No.3 の壁頭ねじれ角について、変位計による測定値とジャイロセンサの回転角を同定した算定結果を図 3.1.2-7 に示す。ジャイロセンサは壁試験体の東側と西側に 5 個ずつ設置しており、東側の 5 個を東群センサ、西側の 5 個を西群センサとしている。西群センサは 5 個のセンサ間の時刻同期の精度があまり良くなかったため、図 3.1.2-7 には時刻同期の精度の高かった東群センサの算定結果を示している。加振 No.7 は最もねじれ角が大きかった加振である。振幅が 1/1,000 rad 前後の小さなねじれ角だが、ジャイロセンサによる算定値はおおよその傾向を捉えている。

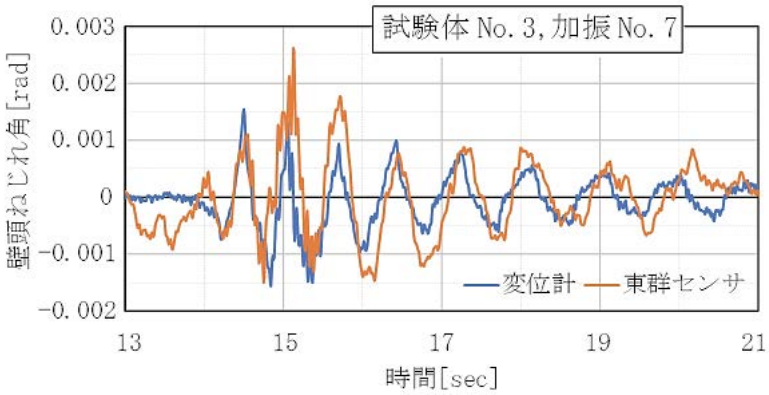
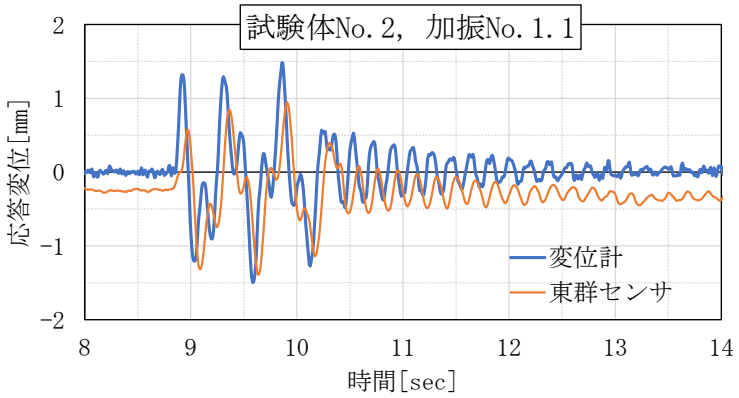
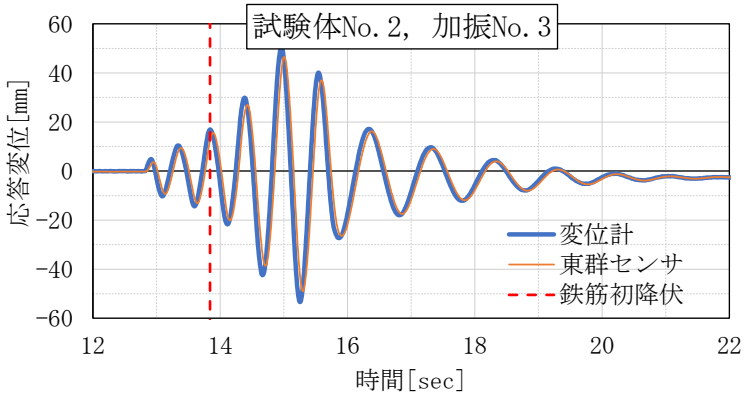


図 3.1.2-7　変位計とジャイロセンサによる壁頭ねじれ角の比較（試験体 No.3）

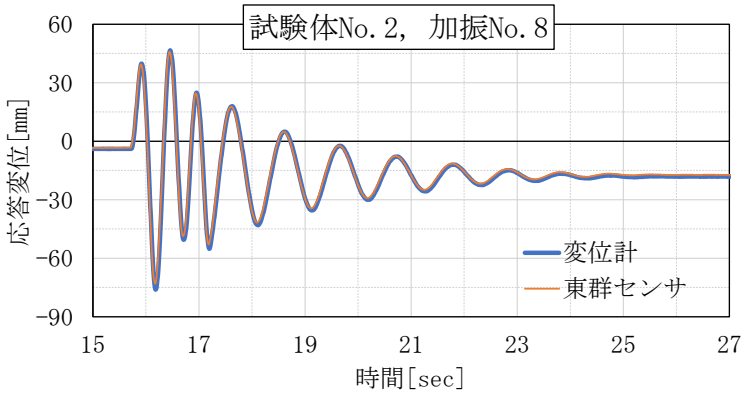
壁頭水平変位（南北方向変位）は、令和 4 年度に正弦波加振を行った試験体 No. 2 と令和 5 年度に地震波加振を行った試験体 No. 4 について、変位計による測定値とジャイロセンサの回転角を同定した算定結果をそれぞれ図 3. 1. 2-8 と図 3. 1. 2-9 に示す。両図とも壁頭の時刻歴応答水平変位で、最初の加振、軸方向鉄筋が初めて壁脚で降伏した時の加振、最後の加振の結果を示しており、ジャイロセンサによる算定値は時刻同期の精度が高かった東群センサの結果を採用している。壁頭の水平変位測定位置は壁脚から 1,535 mm（図 3. 1. 2-1 参照）なので、水平変位 1.5 mm で約 1/1,000 rad である。



(a) 加振 No. 1. 1



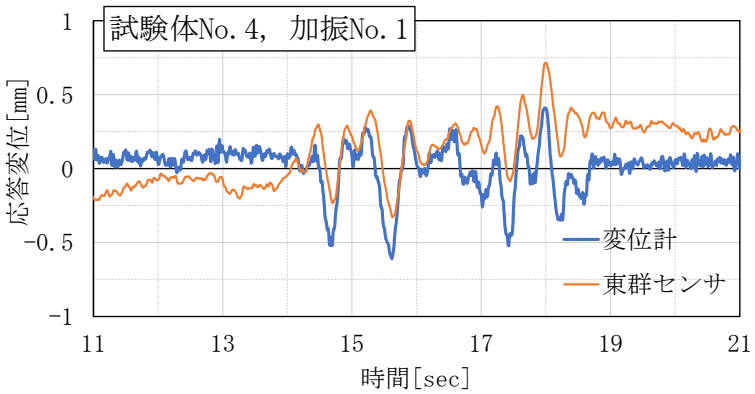
(b) 加振 No. 3



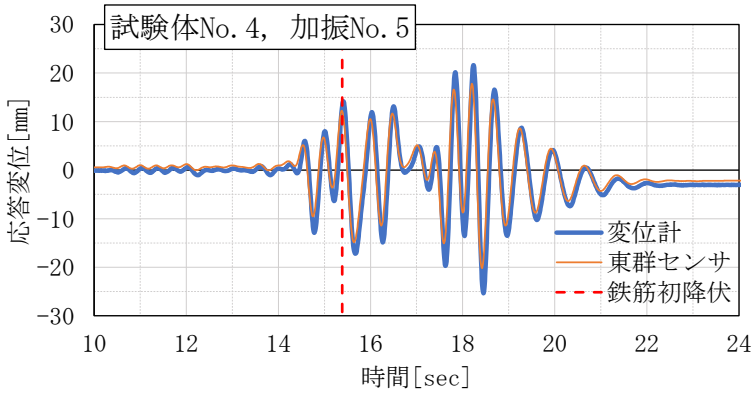
(c) 加振 No. 8

図 3. 1. 2-8　変位計とジャイロセンサによる壁頭水平変位の比較（試験体 No. 2）

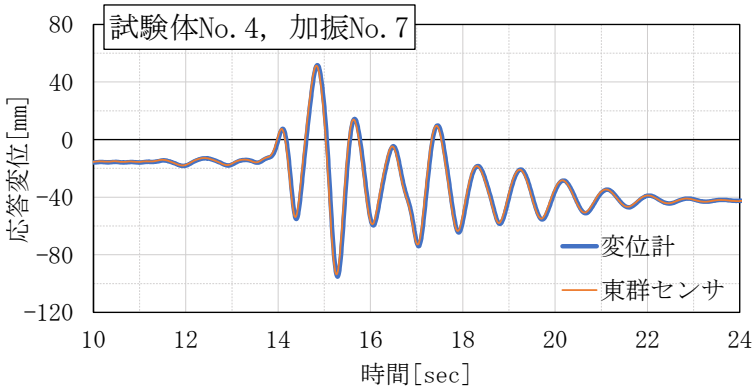
ジャイロセンサによる算定結果は、図 3.1.2-8 と図 3.1.2-9 より、1/1,000 rad 以下の小さな振幅では巨視的に挙動を捉えている程度であるが、軸方向鉄筋が降伏する変形になると精度良く測定できていることが分かる。最後の加振は最も振幅の大きい結果であるが、③項の積分方法により残留変位まで精度良く測定できており、令和 4 年度の方法に比べて精度が改善されていることが分かる。なお、図 3.1.2-7 に示した試験体 No.3 のねじれについては、小さなねじれ角でしか測定精度を確認できなかったが、試験体 No.2 と No.4 の壁頭水平変位と同様に、ねじれ角が大きくなれば実用上は十分な精度が得られる可能性が考えられる。



(a) 加振 No.1



(b) 加振 No.5



(c) 加振 No.7

図 3.1.2-9　変位計とジャイロセンサによる壁頭水平変位の比較（試験体 No.4）

⑤ センサを用いた部材の変形測定方法を建物の挙動算出に拡張する。ここでは、図 3.1.2-10 に示すように外構面にセンサを鉛直方向へ一列に設置し、センサ回転角の測定値から建物変形を算出する簡易な方法を提案する。

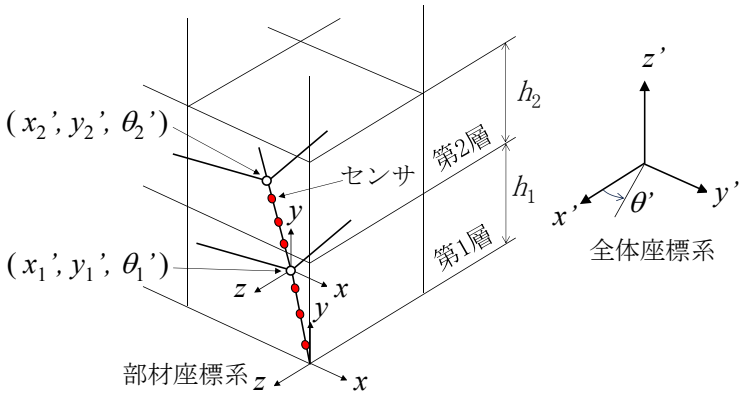
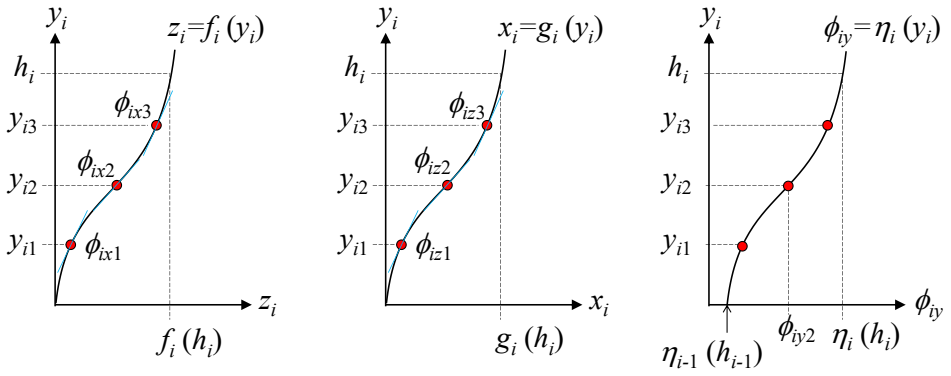


図 3.1.2-10　建物の変形算出の概念図

図 3.1.2-10 は建物の平面角部にセンサを設置した場合を示している。建物の全体座標系を x'-y'-z' 座標系、それぞれの部材座標系を x-y-z 座標系としている。部材座標系は、材軸方向を y 軸としており、建物の変形で併進し、回転はしないものとする。つまり、部材座標系の y 軸は常に全体座標系の z' 軸と同じ方向である。センサの回転角をそれぞれの軸回りに(ϕ_x，ϕ_y，ϕ_z)とし、これらの回転角から建物各層の水平変位と z' 軸回りのねじれ角(x'，y'，θ')を算出する。なお、ここでは式展開を簡単にするため、建物全体の回転（全体座標系の回転）は無視できるものとする。図 3.1.2-11 は、第 i 層の部材座標系と部材変形の同定方法で、高さ方向に 3 つのセンサを設置した場合を示している。



(a) z 方向変位　　(b) x 方向変位　　(c) ねじれ角

図 3.1.2-11　第 i 層の部材座標系と部材変形の同定

図 3.1.2-11(a)は z 方向、全体座標系で x' 方向のたわみ曲線を示しており、たわみ曲線は次のように 3 次関数 $z_i=f_i(y_i)$ を仮定する。

$$f_i(y_i) = a_{i1}y_i + a_{i2}{y_i}^2 + a_{i3}{y_i}^3 \qquad \text{式(3.1.2-1)}$$

この曲線の勾配とセンサの x_i 軸回りの回転角が等しいとして同定する。つまり、

$$\phi_{ix} = \frac{df_i}{dy_i} = a_{i1} + 2a_{i2}y_i + 3a_{i3}{y_i}^2 \qquad \text{式(3.1.2-2)}$$

とする。3 つのセンサの回転角より次式を得る。

$$\{\phi_{ix}\} = [Y_i]\{a_i\} \qquad \text{式(3.1.2-3)}$$

ただし、

$$\{\phi_{ix}\} = (\phi_{ix1} \quad \phi_{ix2} \quad \phi_{ix3})^T \qquad \text{式(3.1.2-4)}$$

$$\{a_i\} = (a_{i1} \quad a_{i2} \quad a_{i3})^T \qquad \text{式(3.1.2-5)}$$

$$[Y_i] = \begin{bmatrix} 1 & 2y_{i1} & 3{y_{i1}}^2 \\ 1 & 2y_{i2} & 3{y_{i2}}^2 \\ 1 & 2y_{i3} & 3{y_{i3}}^2 \end{bmatrix} \qquad \text{式(3.1.2-6)}$$

第 i 層頭部の z 方向変位は層の高さ h_i より $f_i(h_i)$ なので、次式となる。

$$f_i(h_i) = \{h_i\}^T[Y_i]^{-1}\{\phi_{ix}\} \qquad \text{式(3.1.2-7)}$$

ただし、

$$\{h_i\}^T = (h_i \quad {h_i}^2 \quad {h_i}^3) \qquad \text{式(3.1.2-8)}$$

全体座標系における第 i 層頭部の x' 方向変位は、次式で算出できる。

$$x_i' = x_{i-1}' + f_i(h_i) = x_{i-1}' + \{h_i\}^T[Y_i]^{-1}\{\phi_{ix}\} \qquad \text{式(3.1.2-9)}$$

同様に、全体座標系における第 i 層頭部の y' 方向変位は、図 3.1.2-11(b)に示すようにたわみ曲線を 3 次関数 $x_i=g_i(y_i)$ で仮定すれば、次式で算出できる。

$$y_i' = y_{i-1}' + \{h_i\}^T[Y_i]^{-1}\{\phi_{iz}\} \qquad \text{式(3.1.2-10)}$$

ねじれ角については、次に示す 3 次関数 $\phi_{iy}=\eta_i(y_i)$ と y 軸まわりのセンサ回転角 ϕ_{iy} を同定する。ただし、$\eta_{i-1}(h_{i-1})$ は下層頭部のねじれ角である。

$$\eta_i(y_i) = \eta_{i-1}(h_{i-1}) + c_{i1}y_i + c_{i2}{y_i}^2 + c_{i3}{y_i}^3 \qquad \text{式(3.1.2-11)}$$

3 つのセンサの回転角より次式を得る。

$$\{\phi_{iy}\} - \eta_{i-1}(h_{i-1})\{1\} = [Y_i']\{c_i\} \qquad \text{式(3.1.2-12)}$$

ただし、

$$\{\phi_{iy}\} = (\phi_{iy1} \quad \phi_{iy2} \quad \phi_{iy3})^T \qquad \text{式(3.1.2-13)}$$

$$\{c_i\} = (c_{i1} \quad c_{i2} \quad c_{i3})^T \qquad \text{式(3.1.2-14)}$$

$$[Y_i'] = \begin{bmatrix} y_{i1} & {y_{i1}}^2 & {y_{i1}}^3 \\ y_{i2} & {y_{i2}}^2 & {y_{i2}}^3 \\ y_{i3} & {y_{i3}}^2 & {y_{i3}}^3 \end{bmatrix} \qquad \text{式(3.1.2-15)}$$

第 i 層頭部のねじれ角は層の高さ h_i より $\eta_i(h_i)$ であり、全体座標系における第 i 層頭部のねじれ角 θ_i' は $\eta_i(h_i)$ に等しいので次式を得る。

$$\theta_i' = \theta_{i-1}' + \{h_i\}^T [Y_i']^{-1} \left(\{\phi_{iy}\} - \theta_{i-1}'\{1\}\right) \qquad \text{式(3.1.2-16)}$$

以上、式(3.1.2-9)、式(3.1.2-10)、式(3.1.2-16)より建物各層の水平変位と z' 軸回りのねじれ角(x', y', θ')を算出できる。

(2) センサ最適配置の検討システムの開発

【令和 4 年度までの概要】

令和 3 年度には、検討システムで用いる解析モデルを FEM により作成するため、まず、原子力建屋を模した弾性の FE モデルを作成し、固有値解析により固有周期と振動モードを確認した。また、原子炉格納容器（Primary Containment Vessel：以下、PCV という。）と原子炉圧力容器（Reactor Pressure Vessel：以下、RPV という。）は建屋の構造体の振動に影響を与えないことを確認した。

令和 4 年度には、センサ最適配置の検討に用いる詳細モデルと簡易モデルを作成した。詳細モデルは、令和 3 年度の FE モデルで PCV と RPV のないものとした。簡易モデルは、詳細モデルを時刻歴応答解析が可能となるように簡略化したものを開発した。

【令和 5 年度実施内容及び成果】

① 目的は、FEM による数値解析により、センサの最適配置を検討するシステムを開発することである。このシステムの活用方法の 1 例として、動的及び静的な数値解析を行い、想定したセンサの設置位置での回転角から建物の変形を算定し、視覚的にアウトプットする。

② 図 3.1.2-12 にセンサ最適配置の検討システムと活用方法のフローを示す。数値解析に用いる FE モデルは、図 3.1.2-13 に示す詳細モデルと簡易モデルの 2 種類である。詳細モデルは、梁や柱をビーム要素、壁や床をシェル要素、基礎マットスラブをソリッド要素でモデル化されている。簡易モデルは時刻歴応答解析用で、シェル要素と一部単独柱をビーム要素でモデル化されている。いずれも令和 4 年度の方法でモデル化した。

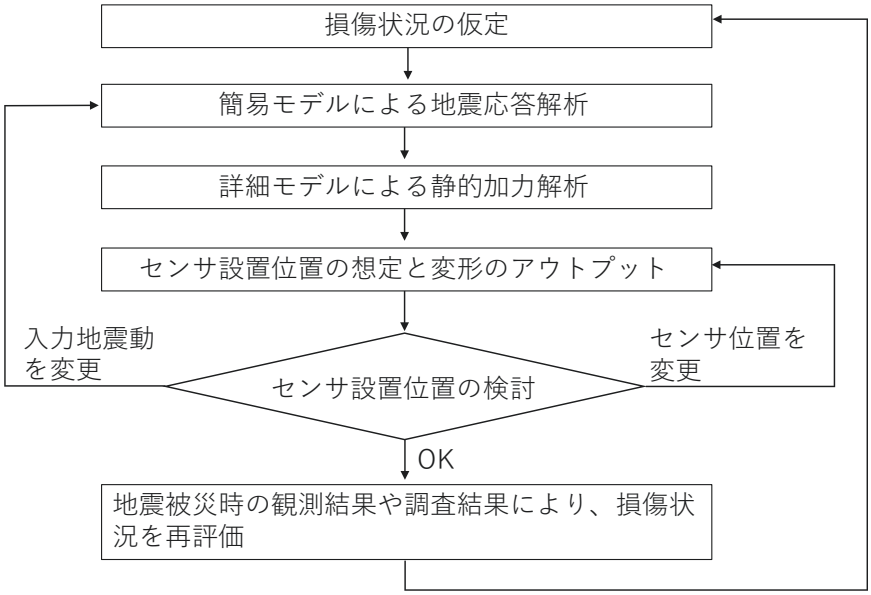
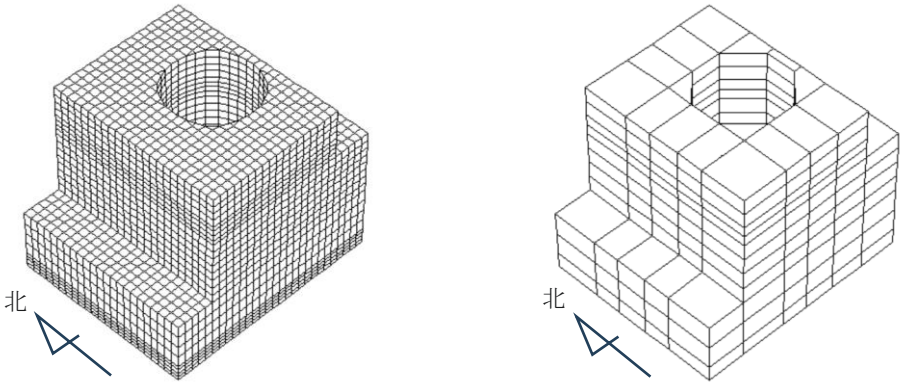


図 3.1.2-12　センサ最適配置の検討システムと活用方法のフロー



(a) 詳細モデル　　(b) 簡易モデル

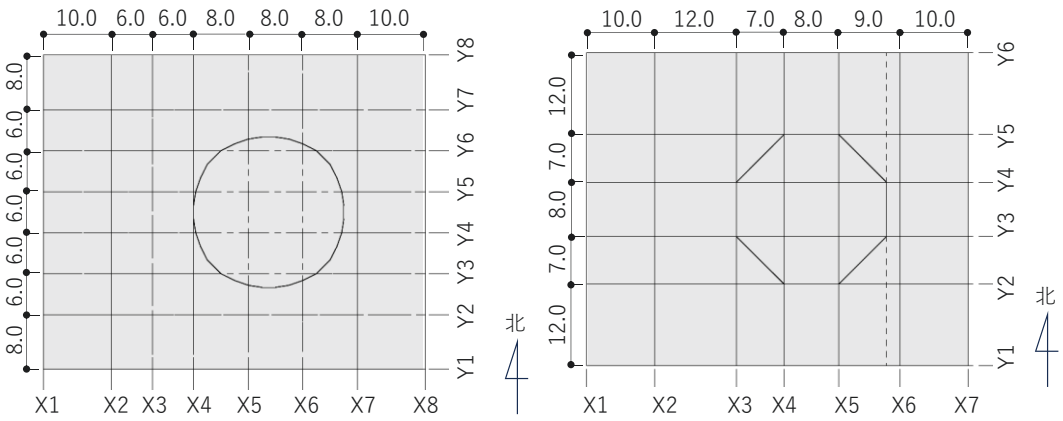
図 3.1.2-13　有限要素モデルの全体図

図 3.1.2-12 に示すように、まず 2 つのモデルで現状の損傷状況を仮定し、損傷のある部材は剛性を低減、あるいは剛性と重量の両方を低減することで、仮定した損傷状況をモデルに反映する。簡易モデルで地震応答解析を行い、最大応答時の変位を詳細モデルへ静的に入力し、除荷する。詳細モデルの解析結果より、想定したセンサ設置位置での回転角を求め、それらの回転角を用いて“3.1.2 項(1)建物の挙動の算出方法の開発⑤”で示した方法により建物の変形を算定する。最大変位時の詳細モデルによる建物の変形と、センサ設置位置の回転角から算定した建物の変形を視覚的に比較する。また、除荷時の残留変形を生じる位置を把握する。これらの情報を基に、センサ設置位置の是非を検討する。

この方法を用いれば、センサの想定位置や簡易モデルへの入力地震動を変えながら、最適なセンサ位置を決定することができる。また、実際に地震を受けた場合は、センサ

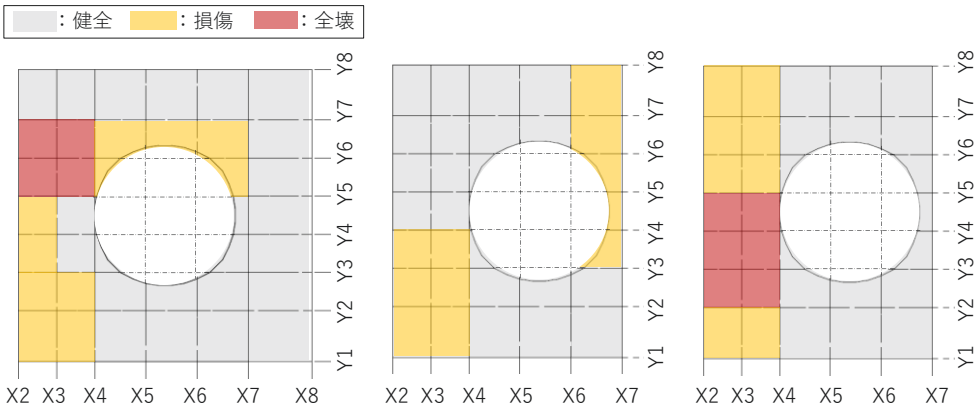
の観測値から建物の変形を算定し、必要に応じて調査して損傷状況を再評価し、センサ設置位置の変更や追加などを検討する活用方法も考えられる。

③ 以下に活用方法の 1 例を示す。損傷状況の仮定は、構造体の損傷状況を「福島第一原子力発電所　特定原子力施設に係る実施計画（東京電力 HD）」[3.1.2-2]を参考にして「健全」「損傷」「全壊」に区分し、FE モデル（詳細モデルと簡易モデル）に損傷状況を反映する。図 3.1.2-14 には詳細モデルと簡易モデルの地下 1 階平面と通り芯を示しており、仮定した損傷状況を、詳細モデルについては図 3.1.2-15 と図 3.1.2-16、簡易モデルについては図 3.1.2-17 と図 3.1.2-18 に示す。図示されていない階はすべての部材で「健全」としている。FE モデルの材料特性は、「損傷」の部材はコンクリート及び鉄筋ともヤング率と強度を 0.5 倍にした。「全壊」の部材は、コンクリート及び鉄筋ともヤング率と強度を 0.1 倍にし、重量を 0.3 倍にした。



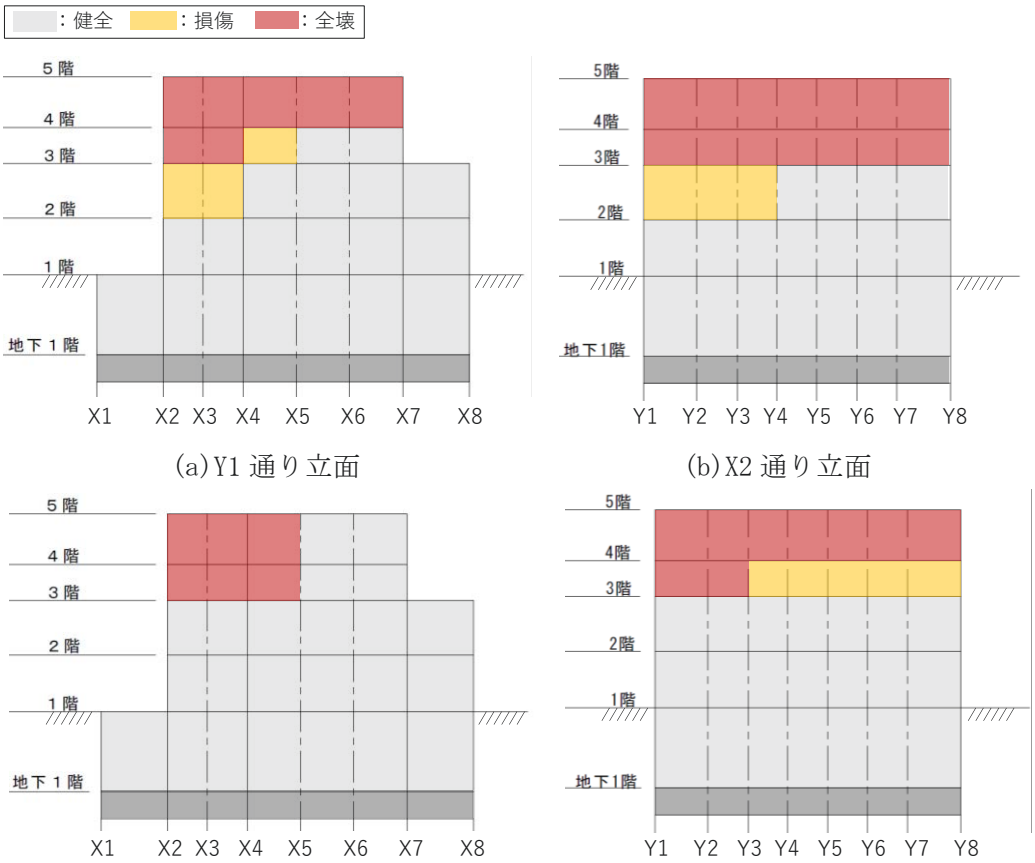
(a) 詳細モデル　　(b) 簡易モデル

図 3.1.2-14　有限要素モデル地下 1 階平面（単位：m）



(a) 3 階平面　　(b) 4 階平面　　(c) 5 階平面

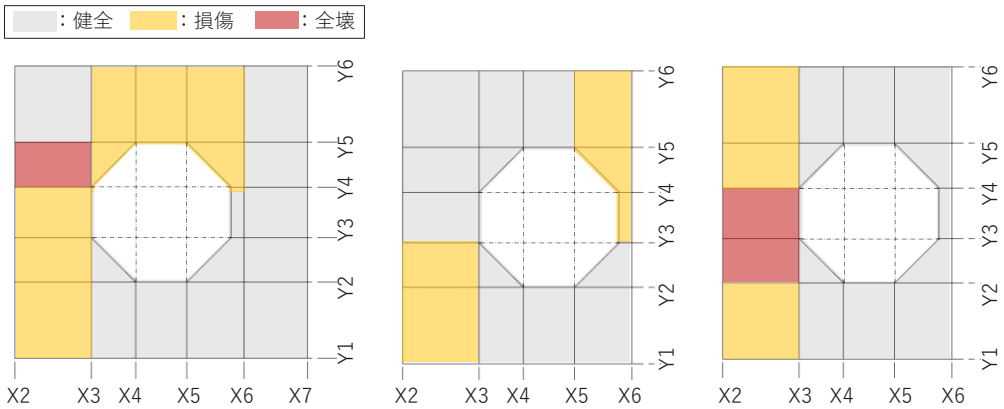
図 3.1.2-15　詳細モデルで仮定した損傷状況（床スラブ）



(a)Y1 通り立面　(b)X2 通り立面

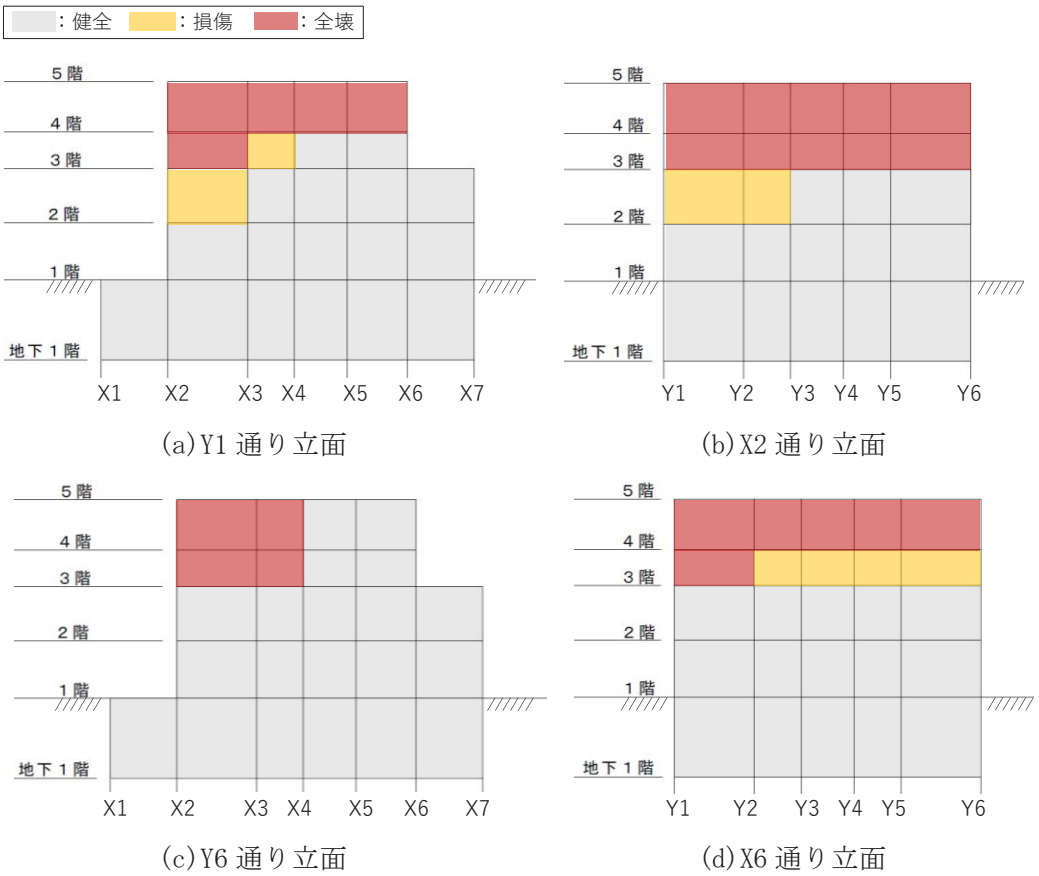
(c)Y8 通り立面　(d)X7 通り立面

図 3.1.2-16　詳細モデルで仮定した損傷状況（外壁）



(a)3 階平面　(b)4 階平面　(c)5 階平面

図 3.1.2-17　簡易モデルで仮定した損傷状況（床スラブ）



(a) Y1 通り立面　(b) X2 通り立面

(c) Y6 通り立面　(d) X6 通り立面

図 3.1.2-18　詳細モデルで仮定した損傷状況（外壁）

④ 簡易モデルは、時刻歴地震応答解析に用いる。図 3.1.2-19 は入力地震波で、平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分に 1F 第 3 号機の基礎マットで観測された東西方向の加速度記録[3.1.2-3]の加速度を 2 倍にしたものである。この地動加速度を簡易モデルの東西方向へ入力した時の建物頂部の応答変位時刻歴を図 3.1.2-20 に示す。

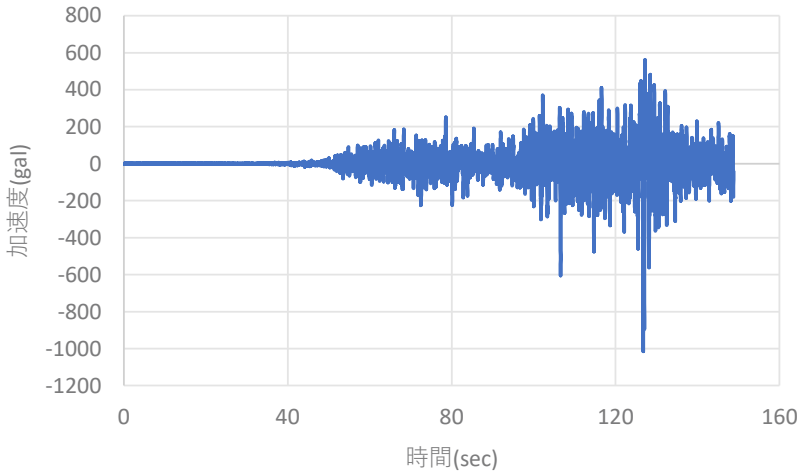


図 3.1.2-19　簡易モデルへの入力地動加速度

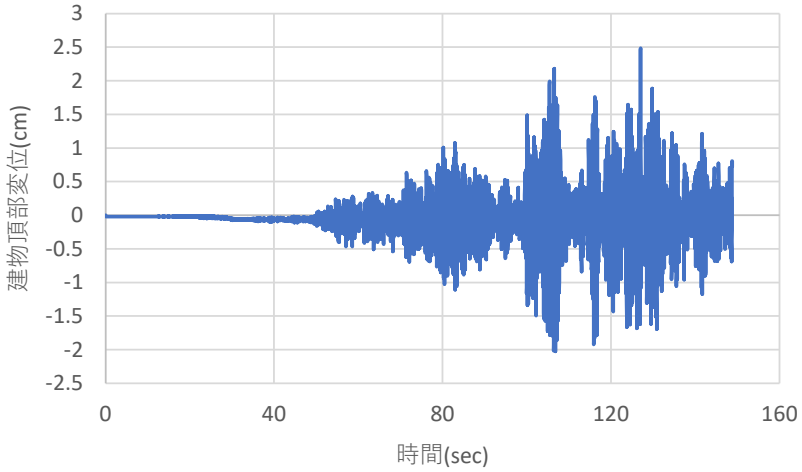


図 3.1.2-20　簡易モデルの建物頂部の時刻歴応答変位

詳細モデルには、簡易モデルに地震動を入力した時の最大応答変位時の床変位を静的に入力する。図 3.1.2-20 より最大応答は建物頭部変位で正側の約 2.5 cm である。この時の簡易モデルの各階床の全節点の変位 6 成分（3 方向並進及び 3 軸まわり回転）を、詳細モデルの該当する床の節点に単調に入力し、その後、除荷する。図 3.1.2-21 に建物頂部変位とベースシアの関係を示す。この加力でコンクリートはひび割れを生じており、図 3.1.2-21 より除荷時に若干の残留変位を生じているのが分かる。図 3.1.2-22 は最大変位時の西側外壁の最小主応力コンターである。コンクリートの応力は、コンクリート強度 21 N/mm^2 の 1/3 以下の部分が大半で、あまり高くないことが分かる。図 3.1.2-23 は外壁横筋の降伏状況を示している。3 階西側外壁の頭部の一部で水平鉄筋に 2,000 με 前後のひずみを生じて降伏が見られたが、それ以外に鉄筋の降伏は生じなかった。図 3.1.2-24 は除荷後の残留変形を 500 倍で示しているが、外壁の変形は床スラブのたわみよりも小さいことが分かる。

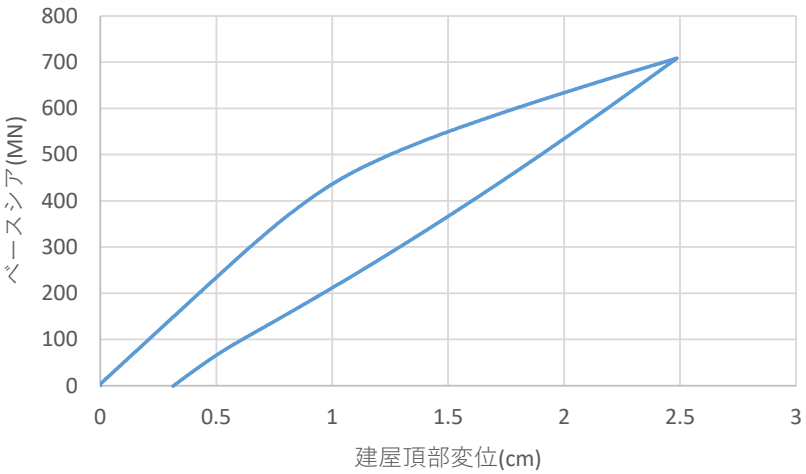


図 3.1.2-21　詳細モデルの静的加力結果

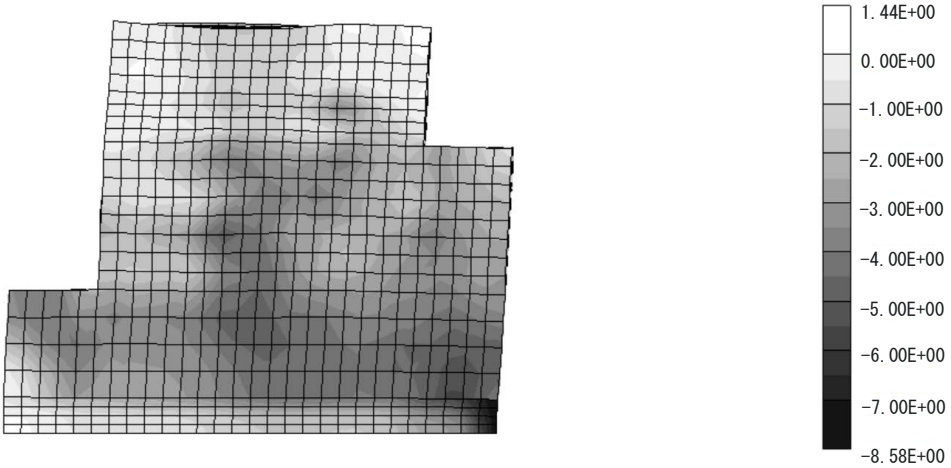


図 3.1.2-22　詳細モデルの最小主応力コンター（南側外壁面）、単位：N/mm^2

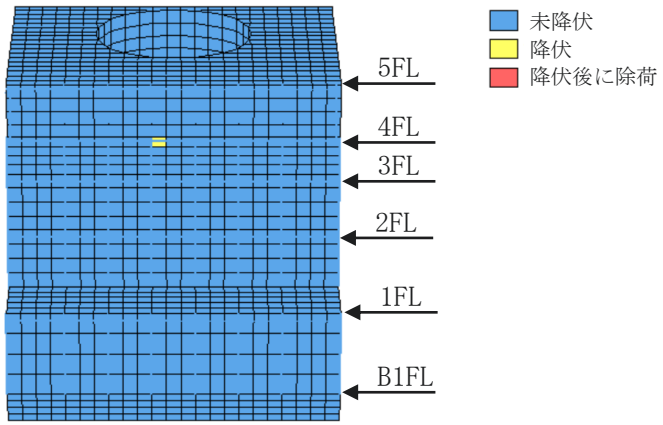
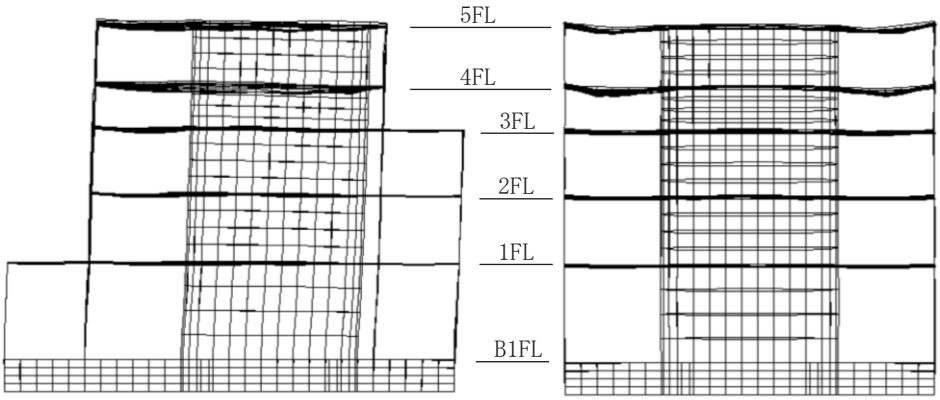


図 3.1.2-23　最大変位時の西側外壁筋の降伏状況（詳細モデル）



(a) 南側　　(b) 西側

図 3.1.2-24　除荷時の残留変形（詳細モデル）、変形倍率：500 倍

⑤ ここでは、センサ設置位置を想定して変形をアウトプットする。センサ設置位置を想定し、“3.1.2 項(1)建物の挙動の算出方法の開発⑤”で示した方法により建物の変形を算定する。想定したセンサ設置位置は図 3.1.2-25 に示す白抜きの丸印で、南側外壁の南東軸に沿って各階に 3 つずつ設置を想定する。各センサの回転角には、FEM 解析結果から得られる節点の回転角を用いる。これらの節点の回転角と式(3.1.2-9)、式(3.1.2-10)、式(3.1.2-16)を用い、各階の東西方向変位、南北方向変位、鉛直軸まわりの回転角を算定する。算定位置は図 3.1.2-25 の黒丸の位置であり、算定値と FEM による解析値を比較したものを図 3.1.2-26 に示す。図より、FEM 解析から得られた建物変位の傾向を算定値である程度表現できていることが分かる。この算定値を用い、加力前の床スラブ外郭を並進及び回転させる。算定値から得られる床スラブの外郭と、床スラブ外郭の節点の FEM 解析結果を視覚的にアウトプットして比較したものが図 3.1.2-27 である。

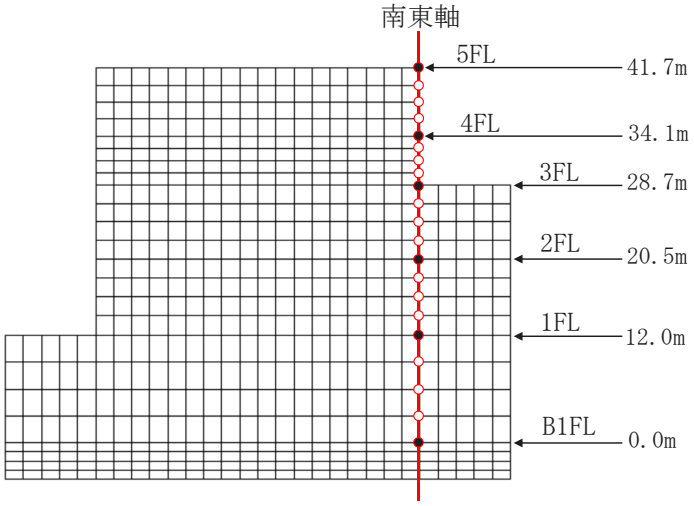


図 3.1.2-25　センサの設置想定位置（南側外壁）

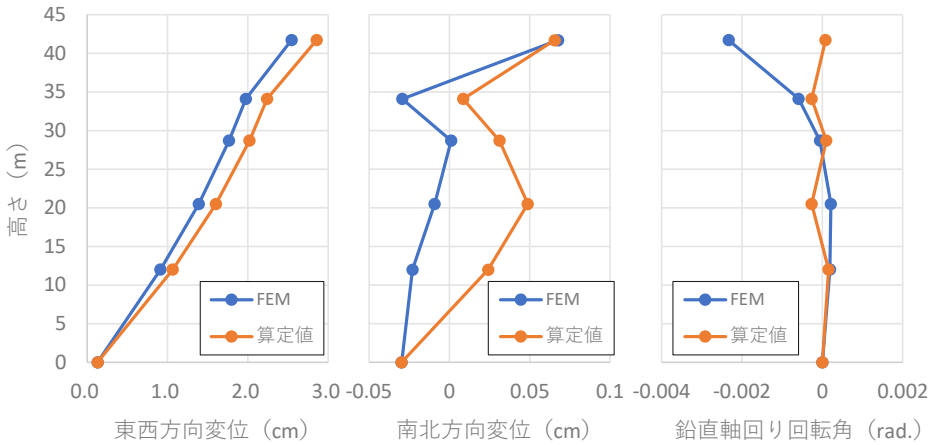


図 3.1.2-26　FEM 解析値と変位算定値の比較（詳細モデル）

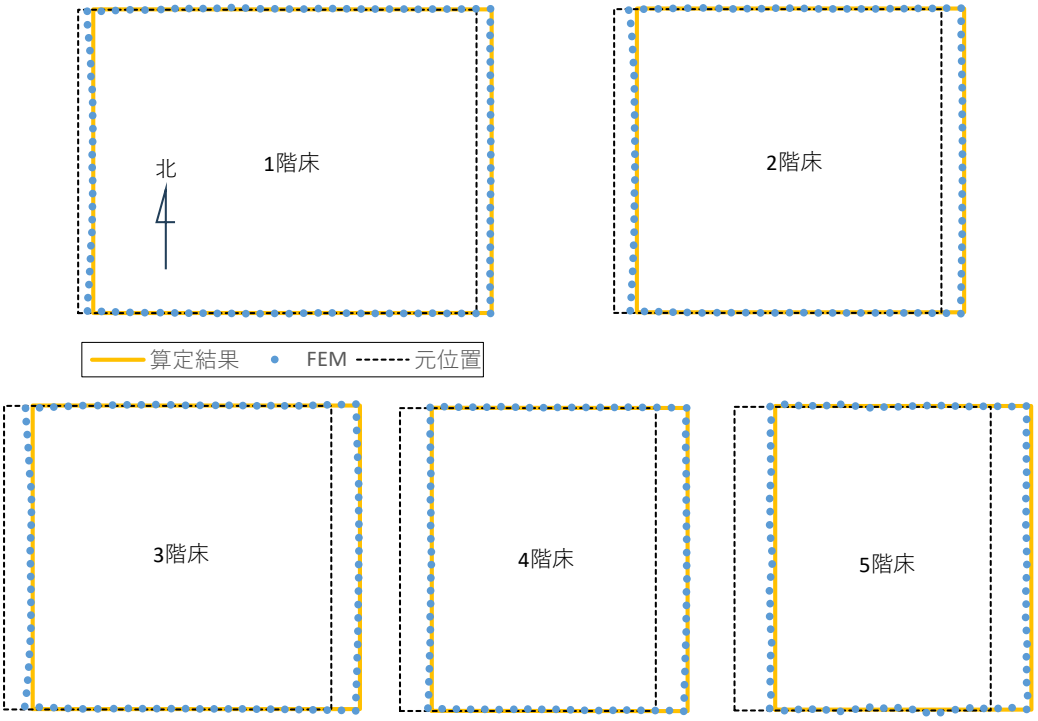


図 3.1.2-27　最大変位時の床スラブ外郭（詳細モデル）、変形倍率：200 倍

図 3.1.2-27 より、算定結果は FEM 解析より得られた各階床変位を概ね評価できており、図 3.1.2-25 で採用した南東軸に沿ったセンサ位置は、建物変形の概略を得るには適当と考えられる。図 3.1.2-27 の FEM 解析値は、1～3 階床の西辺で内側への凹みが見られ、すべての階の床で東西方向に伸びを生じている。これらの挙動を得るには、西側外壁にもセンサを設置すると良いと考えられる。また、図 3.1.2-23 で示した外壁横筋の降伏位置の付近や、図 3.1.2-24 で示した床のたわみの大きい箇所の付近にセンサを設置して、損傷の検知を計画する方法も考えられる。

以上、図 3.1.2-12 のセンサ最適配置の検討システムを活用した 1 例を示した。

※　まとめ

(1) 動的応答・振動性状の観測及び評価

小型模型実験を行い、1 層試験体の非弾性応答と 2 層試験体の弾性応答の観測を行った。また、実験結果に基づき加速度センサの記録から建屋の振動性状（周期特性)、応答変形、復元力特性を推定した。多自由度系については、得られた周期より損傷（剛性低下）の分布を推定する方法を提案し、小型模型実験の結果に適用することでその妥当性を検証した。等価 1 自由度系について、観測記録に基づいて復元力特性（性能曲線と等価粘性減衰定数）を補正し、将来の地震動による応答や被災度を推定するモニタリングシステムを開発した。

(2) 長期変形性状の観測及び評価

RC 壁部材を用いた振動実験の結果を基に、配置したセンサから建物挙動を算出する方法を開発した。FEM により建物変形を検討するための詳細モデルと、時刻歴応答解析用の簡易モデルを、シェル要素などを用いて作成した。簡易モデルを用いた地震応答解析を行い、得られた最大応答変位を詳細モデルに静的に入力・除荷することで建物変形や応力を解析した。配置したセンサの回転角から建物挙動を算出する方法及び簡易モデルと詳細モデルを用いた FEM 解析により、センサの最適配置を検討するシステムを開発した。このシステムの活用例の 1 つとして、詳細モデルの FEM 解析で得られる建物変形と、センサの回転角から得られる建物変形を視覚的にアウトプットして比較し、センサの設置位置の是非を検証した。

3.2　電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発【令和 3 年度～令和 5 年度】

3.2.1　テラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：芝浦工業大学）

【令和 3 年度～令和 5 年度】

【令和 4 年度までの概要】

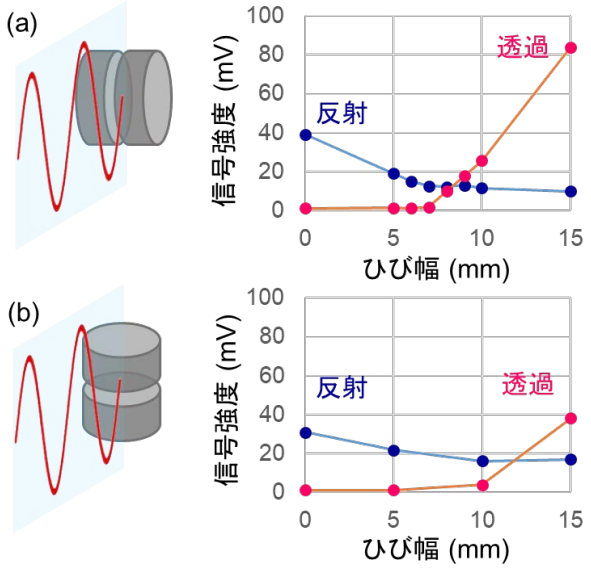
令和 3 年度は、以下の①及び②の項目を実施した。

① 損傷検知システムの設計

サブテラヘルツからテラヘルツにおける複数の周波数、可変のビーム径と偏光方向でサンプルを走査することで反射と透過のイメージ像を得ることができる損傷検知システム（計測システム）を設計した。

動作の確認を行うため、試験体ブロックを用いて計測した。コンクリート構造物の損傷としてひび割れに着目し、損傷がない試験体ブロック間の隙間を調整することで疑似的なひび割れを再現した。

周波数 60 GHz（波長：～5 mm）を用いた計測結果を図 3.2.1-1 に示す。ひび割れ方向と偏光方向が平行である時（図 3.2.1-1(a)）、反射波はひび割れ幅 5 mm で 50%程度の信号の減少が見られたのに対し、透過波の信号はひび割れ幅 7 mm 以上から検出された。ひび割れ方向と偏光方向が垂直である時（図 3.2.1-1(b)）、反射波はひび割れ幅 5 mm で減少が見られたが、減少量は平行条件と比べて少なかった。透過波の信号はひび割れ幅 10 mm 以上から検出され、平行条件と比べて応答が悪かった。このことから、動作の確認が行われたとともに、ひび割れ方向に対してサブテラヘルツ波の偏光方向が敏感に応答することが示唆された。



(a) 偏光方向とひび割れ方向が平行　　(b) 偏光方向とひび割れ方向が垂直

図 3.2.1-1　試験体のひび割れ幅とサブテラヘルツ波の透過及び反射の関係

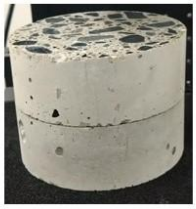
② 測定条件とデータ解析の検討

中性子イメージングによりひび割れの位置と幅が規定された RC 試験体をリファレンスに使用することを想定して、ひびのサイズと方向に対する電磁波の散乱度を複数の電磁波で理論的に多元解析できるアルゴリズムを検討するとともに、計測に適切な周波数を検討した。

その確認として、表 3.2.1-1 に示すようなコア抜きサンプルの、ある深さの表面に水平に分布するひびを想定した測定において、かぶり深さ 40 ㎜の隙間が検出可能であることが分かる。さらに、斜め方向（45°）に発生する亀裂を模擬したサンプルに対しても同様な測定を行い（表 3.2.1-2）、いずれの測定周波数でも表面から 45 ㎜のかぶり深さにある隙間の影響をテラヘルツ波の反射強度が反映していることを確認できた。

表 3.2.1-1　コア抜きサンプルの内部に水平分布するひびのテラヘルツ反射率測定
（上）コア抜きサンプル画像　　（下）各条件における反射率

100 mmΦ



	8.7 GHz	10 GHz	11.2 GHz	12.5 GHz
隙間無し	**1** （1.2 mV）	**1** （1.8 mV）	**1** （3.8 mV）	**1** （2.8 mV）
反射板設置	**4.1**	**1.1**	**0.82**	**0.51**
隙間：1 mm	**1.6**	**1.6**	**0.82**	**1.3**
隙間：2 mm	**2.4**	**2.3**	**0.75**	**1.5**
隙間：3 mm	**2.7**	**2.4**	**0.70**	**1.5**

表 3.2.1-2　内部に亀裂が斜め方向に発生する試験片のテラヘルツ反射率測定

	8.7 GHz	10 GHz	11.2 GHz	12.5 GHz
高さ78 mm	1	1	1	1
反射板設置	0.63	1.46	0.35	0.52
高さ88 mm　幅1 mm	0.25	0.41	0.72	0.65

令和 4 年度は、中性子イメージング測定に適用するコンクリート試験体である亀裂を模擬するスリットと鉄筋を内部に含む 12 種類に対して実施した。内容を以下に示す。

亀裂はかぶり 10 ㎜の位置に深さ方向 15 ㎜に形成し、幅のパラメータとしては 3 ㎜、1 ㎜、0.5 ㎜の 3 水準としている。10 ㎜のかぶり深さの半分に対応する 5 ㎜厚のコンクリート試験体に対するサブテラ/テラヘルツ波の透過特性を図 3.2.1-2 に示す。1 THz 以上の周波数領域では透過率が 5%以下であり、テラヘルツ波の高周波領域においてはかぶりがごく浅い表面近傍における測定に有効であることが分かる。かぶり 10 ㎜の深さに存在する亀裂及び鉄筋の影響を検出する反射測定としては、膜厚の往復に相当する 20 ㎜のコンクリートを透過する必要がある。そのため、コンクリートに対する透過性が高いサブテラヘルツ波を適用して測定するが、測定周波数に対応する波長と測定対象のサイズには比例関係があるのでテラヘルツ波が検出対象とする亀裂サイズに関する知見を得ることができる。

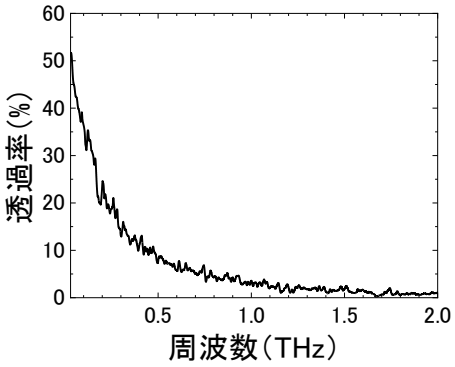


図 3.2.1-2　コンクリート試験体の透過率測定結果（コンクリート膜厚：5 ㎜）

幅 3 ㎜の試験体に透過性がある周波数帯において、偏光方向を亀裂の発生方向に対して平行と垂直とした時に測定した反射スペクトルについて、垂直方向に対して平行方向の強度比（偏光強度比）を図 3.2.1-3 に示す。強度比をデータ処理することで偏光方向による反射強度の違いを抽出することが可能である。偏光方向に亀裂が連続する平行の場合は空気の割合が大きいので実効的な屈折率が小さく、それに対して垂直の場合は亀裂の長さが制限されるので空気の割合が小さいため屈折率が大きい。屈折率の違いが反射率に反映することで、亀裂幅 3 ㎜の試験体では 14.3 GHz において、偏光強度比(平行/垂直)が減衰する。偏光強度が減衰する周波数は亀裂の幅で変化し、亀裂が 0.5 ㎜まで狭くなると 13.6 GHz にシフトすることが図 3.2.1-4 で見て取れる。なお、亀裂の検出に適する測定周波数は亀裂のかぶり深さと幅、コンクリート組成に基づく屈折率によるものである。13.6 GHz の波長は 22.1 ㎜であり、波長に対する亀裂のサイズはおよそ 1/40 と波長と比較して十分に小さい。ちなみにどちらかの偏光方向による測定の空間分解能（検出できる亀裂サイズ）は理論的に波長程度である。テラヘルツ波の測定においても同じ縮尺での亀裂が検出可能であり、例えば 1 THz の波長は 0.3 ㎜であるので、1 THz の測定におけるコンクリート表面近傍の検出亀裂は 8 μm であることが分かる。このように反射率の偏光方向による変化と周波数を解析することで、コンクリート内部に発生している亀裂の幅と方向を検知することができ、かぶり 10 ㎜にある亀裂を定量的に検出する測定周波数と反射強度の変化からテラヘル

ツイメージングで得られる画像情報の空間分解能に相当する検知精度を定量的に議論するとともに、偏光強度の解析が有効であることを明らかにした。

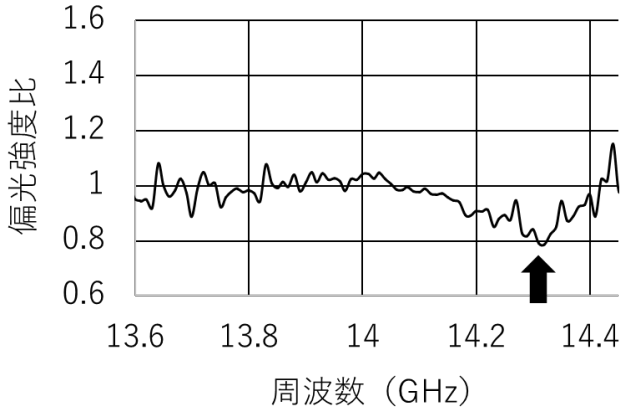


図 3.2.1-3　スペクトルの偏光強度比（亀裂の幅：3 mm）

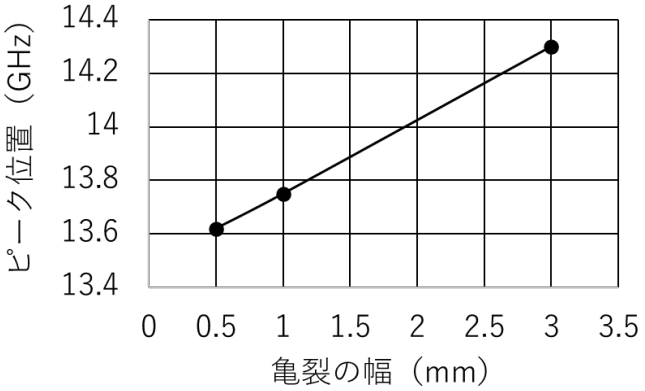


図 3.2.1-4　亀裂の幅による偏光強度減衰位置の変化

ここで、コンクリート構造物内部には鉄筋が存在するので、鉄筋に対する偏光強度についても測定した。亀裂に対する測定と同様、コンクリート試験体において 10 mm かぶり深さにある鉄筋の検出を実験的に解析するため、図 3.2.1-2 で確認できるようにコンクリートに対する透過性が高いサブテラヘルツ波を適用して測定する。10 mm のかぶり深さにある鉄筋の長手方向に対して、サブテラヘルツ波の偏光方向を平行ならびに垂直とした時に測定したスペクトルについて、垂直方向に対する平行方向の強度比を図 3.2.1-5 に示す。偏光強度比は亀裂が存在すると強度比が減少するのに対して、鉄筋に対しては連続的に鉄筋の尾根が存在するので強度比が増加する。かぶり深さが 10 mm の時に鉄筋に垂直な偏光方向に対する平行な偏光強度比は 13.5 GHz で確認でき、図 3.2.1-6 に示すようにその周波数はかぶり深さが大きくなると低周波数側にシフトする。13.5 GHz の波長は 22.2 mm であり、波長に対するかぶり深さの寸法はおよそ 2 倍である。テラヘルツ波の測定においても同じ縮尺での測定が可能であり、例えば 1 THz の波長は 0.3 mm であるので、1 THz の測定において鉄筋を検出できるかぶり深さは 0.6 mm である。このように偏光強度比を算出するデータ処理は画像情報を補完

するもので、コンクリート構造物内部に存在する欠陥として、亀裂を鉄筋と区別して検出する検知精度を向上するものであることを確認した。

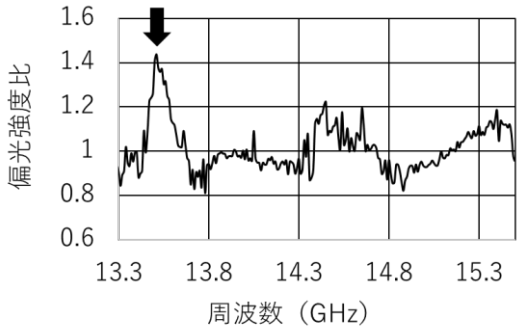


図 3.2.1-5　スペクトルの偏光強度比（かぶり深さ：10 ㎜）

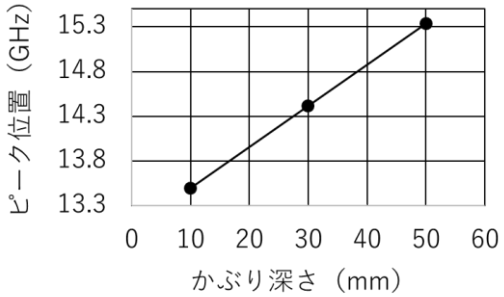


図 3.2.1-6　かぶり深さによる偏光強度ピーク位置の変化

図 3.2.1-7 には腐食生成物として鉄酸化物を取り上げ、テラヘルツ波を用いて測定した Fe_3O_4 及び Fe_2O_3 の反射スペクトルを示す。Fe_3O_4 はマグネタイトと呼ばれる黒さびの成分であるのに対して、Fe_2O_3 はヘマタイトと呼ばれる赤さびの成分である。

Fe_2O_3 の反射スペクトルには 11.1 THz、12 THz、15 THz に吸光度の増大による反射率の減少が見られるのに対して、Fe_3O_4 にはこのような特徴あるスペクトル形状は確認できない。このことからかぶりが浅いコンクリート表面近傍における鉄筋表面の腐食状態に対して、いずれも反射率が数%と小さいがこれらの周波数におけるテラヘルツ波の吸収ピークに着目することでヘマタイト（Fe_2O_3）とマグネタイト（Fe_3O_4）を区別できることを明らかにした。高い含水率に調整されたコンクリートの内部に存在する鉄系腐食生成物の水酸化物であるオキシ水酸化鉄に対して、テラヘルツ波を用いて測定した反射スペクトルを図 3.2.1-8 に示す。ノイズが小さい 5 THz 以上の周波数帯におけるテラヘルツ波の反射率は 1%以下と小さいが、6.8 THz ならびに 8.4 THz において反射率が減少しており、水酸化物の分布を追跡できる可能性がある。

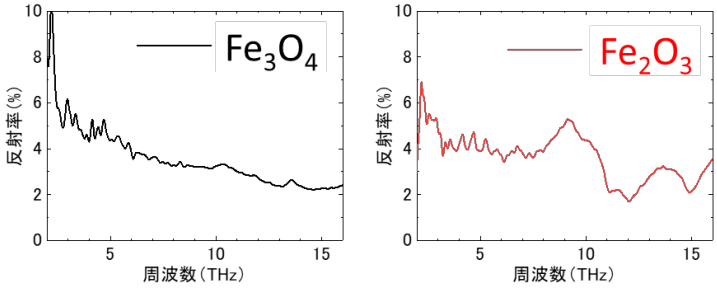


図 3.2.1-7　テラヘルツ周波数帯における鉄酸化物の反射スペクトル

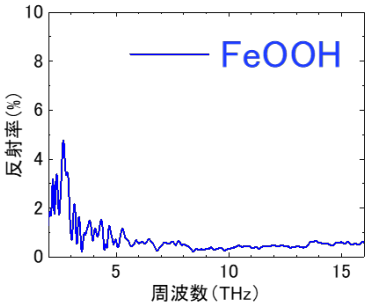


図 3.2.1-8　テラヘルツ周波数帯における鉄水酸化物の反射スペクトル

図 3.2.1-9 は鉄酸化物の組成を Fe_3O_4 に調製した時のコンクリートに対して透明度が高いサブテラヘルツ領域における吸収スペクトルの変化である。灰色のプロットは、他元素の添加により組成が Fe_3O_4 と異なるものである。86.5 GHz 付近で Fe_3O_4 による吸光度が大きいことが分かる。通常、鉄筋には腐食防止のために表面に黒さびの被膜がなされており、コンクリート内部にある鉄筋表面からの反射強度が増加しているとすると、吸収が大きい Fe_3O_4 が鉄筋表面から消失していることが考えられ、鉄筋腐食の進行が危惧される。このようにサブテラ/テラヘルツ波の反射率からコンクリートにおける腐食生成物の空間分布を知ることができることが分かり、かぶりが浅くかつ水分量が大きいコンクリート表面近傍の鉄系腐食生成物の検出にはテラヘルツ波を適用し、深いかぶり部にある鉄筋表面の状態を確認するにはテラヘルツ波に対して低周波数側のサブテラヘルツ波を適用するという測定指針により、イメージング測定における鉄筋腐食劣化の検出精度向上が期待できる。

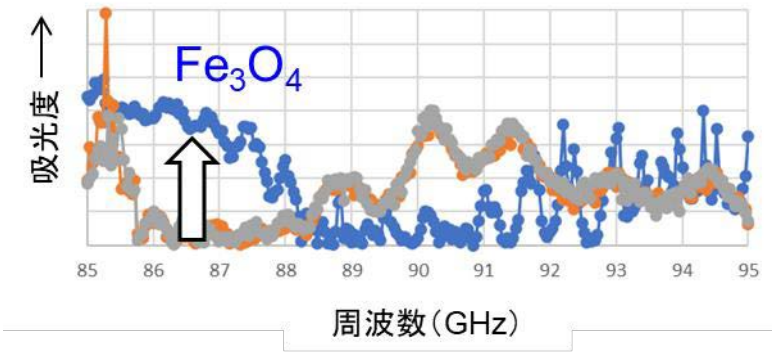


図 3.2.1-9　鉄酸化物を Fe_3O_4 に調製した時の吸収スペクトルの変化

同様のことを水に対しても適用して、前述の鉄系腐食生成物として水酸化物が存在する高湿雰囲気に調整されたコンクリートの含水率に関する知見をテラヘルツ技術に関する基礎情報として得る。透過特性に対する含水率の影響が議論しやすいように透過性が高い各種木材を試験体として、含水率に対する透過特性を 63.5 GHz で測定した結果を図 3.2.1-10 に示す。この結果から、高湿雰囲気におけるコンクリートの含水率は 10%程度であることが分かる。含水率が小さい方が透過性が高いことは極性分子である水分子による吸収が大きいという特性（ドルーデモデル）を反映している。ちなみに、低周波の方が透過するというのは物質に対する一般的な傾向（電子に対する特性）であるが、実際の測定ではコンクリートの組成に基づく吸収や構成粒子のサイズによる散乱も考慮する必要がある。

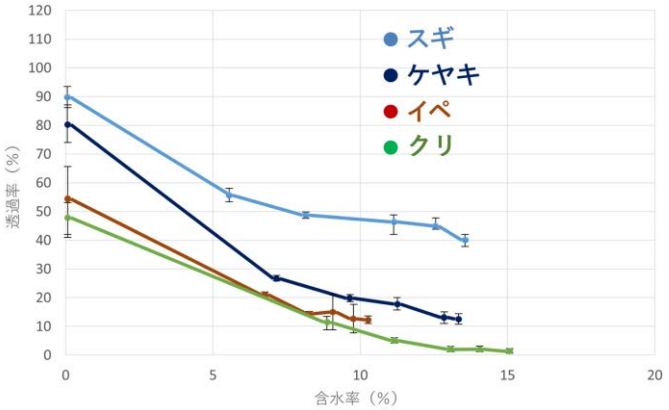


図 3.2.1-10　含水率が異なる木材の透過率（63.5 GHz）

【令和 5 年度実施内容及び成果】

令和 5 年度は、サブテラヘルツ波からテラヘルツ波のイメージデータを対象とする画像処理を行った。コンクリート構造物内部の損傷イメージとして、表層下にあるひびのサイズと位置、水分ならびに腐食生成物の分布を視覚化するアルゴリズムを構築した。

サブテラヘルツならびにテラヘルツの広帯域光源を用いて、固定された光源に対してサンプルを XYZ の 3 次元でスキャンしながら反射率もしくは透過率のマッピング測定が可能なシステムを構築し、コンクリートのサンプルに対して測定周波数も含めた 4 次元（3＋1 次元）イメージデータを取得した。図 3.2.1-11 に示すように、4 次元のパラメータにおけるイメージング像を表示できるシステムとして構築することで、大量のイメージデータを連続的に表示できる。取得した画像データに対して平均化処理をすることで、干渉の影響を軽減した結果を得ることができることを確認した。また、腐食生成物の吸収特性に合わせた周波数帯のイメージを観察することにより、腐食生成物の種類を特定することができるようになる。

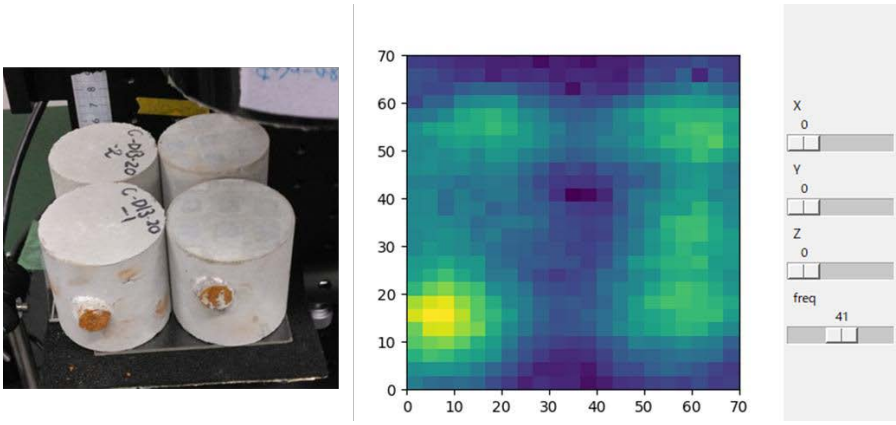


図 3.2.1-11　4 次元イメージングの測定サンプル（左）とイメージデータ（右）

図 3.2.1-12 はコンクリート構造物の表層下 10 mm のかぶり位置に幅が 3 mm の亀裂が内部に形成されたサンプルに対するイメージデータとして、偏光方向を亀裂に対して平行と垂直にして測定したイメージ像（平均化の処理済）を示す。追加した画像処理の解析アルゴリズムとして、平行成分を垂直成分で割り算することで、偏光に依存する亀裂の検出プロセスを実現した。なお、検出できる亀裂のサイズは令和 4 年度の解析を基に考えると、13.6 GHz での測定では 0.5 mm、1 THz の測定では 8 μm である。

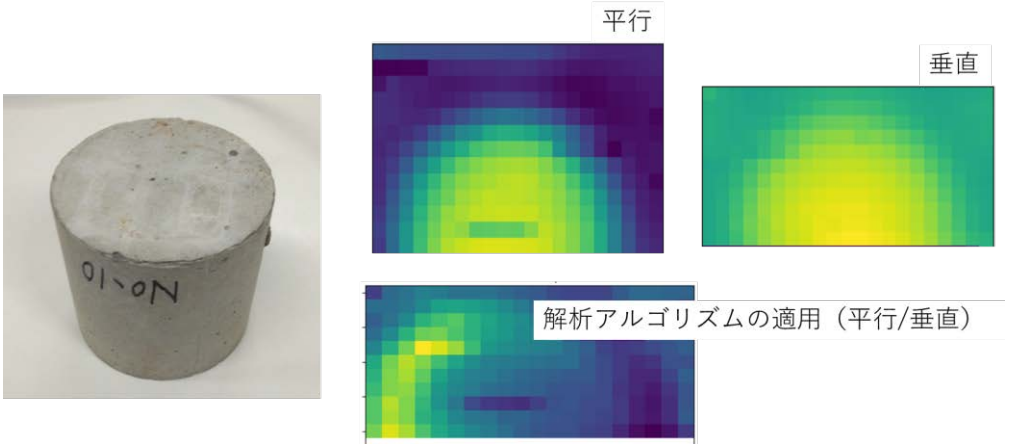


図 3.2.1-12　4 次元イメージングによる内部亀裂の検出
（左）測定サンプルの外観、（右）偏光解析処理した画像データ

画像処理の手法検討として、コンクリート構造物の表層下 10 mm のかぶり位置に 10 mmφの鉄筋を内部に含むサンプルを 14.1 GHz において測定したイメージデータに対して、偏光解析以外の画像処理をした。平均化処理ならびに FFT（Fast Fourier Transform：高速フーリエ変換）処理による高周波成分除去を適用した結果を図 3.2.1-13 に示す。FFT 処理の適用により、明暗の鮮明度が向上するが鉄筋の位置（左下部に設定）は確認できず、追加処理として微分フィルターを適用しても鉄筋位置の確認には有効でないことを確認した。

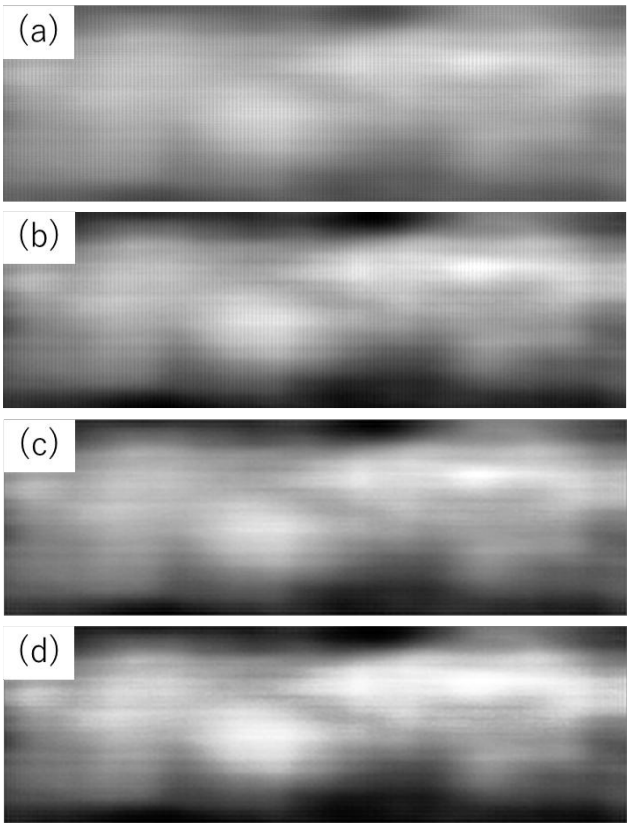


図 3.2.1-13　4 次元イメージングによる内部鉄筋の検出
(a)未処理、(b)平均化、(c)FFT 処理、(d)微分フィルターを適用した FFT 処理

テラヘルツの周波数領域におけるイメージデータでは図 3.2.1-14 に示すように反射率が小さく、内部情報を検出できるイメージデータの測定ができないことを確認した。$CaCO_3$ と $Ca(OH)_2$ を同量混合した模擬コンクリートをプレスとして、テラヘルツ波による測定ができるかぶり深さについて透過反射特性を確認すると、かぶりが 0.5 mm まで浅くなると内部にある金属表面からの反射信号を確認できた。この結果において、テラヘルツ波はコンクリート表面近傍のみにある腐食生成物が評価対象となることが分かり、0.5 mm のかぶり厚さはファイバー接近におけるコンクリート薄肉化の指標である。図 3.2.1-7 から分かるように、Fe_2O_3 は反射スペクトルで 11.1 THz、12 THz、15 THz において反射率の減少するのに対して、Fe_3O_4 にはこのような反射率の減少は見られず、ヘマタイト（Fe_2O_3）とマグネタイト（Fe_3O_4）を区別することができる。

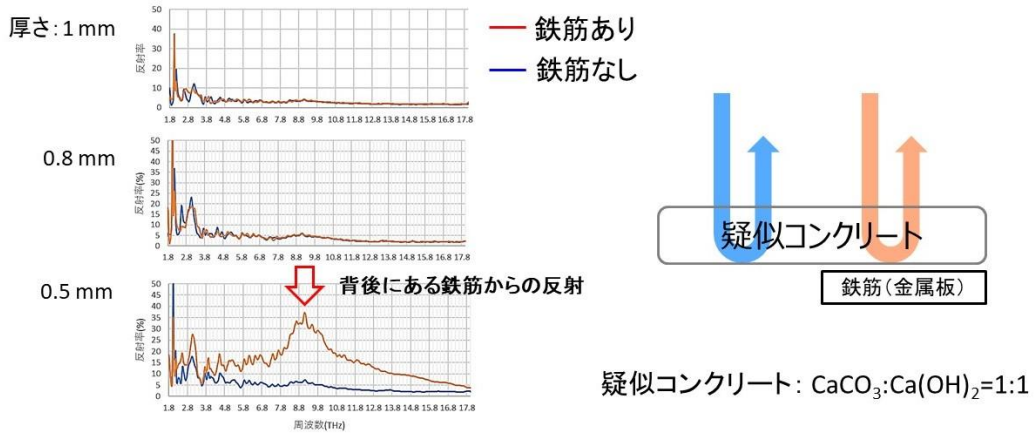


図 3.2.1-14　模擬コンクリートで覆われた金属板からのテラヘルツ反射率

これらの測定結果ならびに木更津高専から提供されたデータを基に、サブテラヘルツ波ならびにテラヘルツ波により検知できるコンクリート構造物の内部損傷として、表層下にあるひびのサイズや位置、水分ならびに腐食生成物の分布を対象に、測定手法や画像処理を含む解析方法を表 3.2.1-3 にまとめた。

表 3.2.1-3　サブテラヘルツ/テラヘルツによる非破壊診断対象と解析手法

			サブテラヘルツ(干渉回避)	サブテラヘルツ(偏光解析適用)	サブテラヘルツ(増幅高出力化)	テラヘルツ	テラヘルツ(偏光解析適用)	テラヘルツ(ファイバーによる接近)
電磁波の浸透性 内部構造が観察できるかぶり深さ		かぶり0.5 cm	×	○	○	○	×	○
		かぶり1 cm	×	○	○	×	×	○
		かぶり5 cm	×	×	○	×	×	○
		かぶり20 cm	×	×	○ 20 GHz	×	×	○
損傷要素の検出	ひび割れ	1 mm幅	×	○	○	△	△	○
		0.5 mm幅	×	○ 15 GHz	×	×	△	○
		0.01 mm幅	×	×	×	—	△ 1 THz	—
		損傷度	○	—	○	—	—	—
	水分	～8 %@コンクリート	○	×	○	×	×	×
		～20 %@ペースト	○	×	○	×	×	×
	腐食	オキシ水酸化物	×	×	△ 散乱	○	×	○
		ヘマタイト	×	×	△ 散乱	○	×	○
		マグネタイト	○	×	○	○	×	○

サブテラヘルツ波による広範囲における遠隔診断も含めて、サブテラヘルツ波ならびにテラヘルツ波を活用する近距離からの非破壊診断として、表層下にある損傷検知の診断フローを図 3.2.1-15 に示す。

遠距離からの診断でも、サブテラヘルツ波を平行ビームに成形できれば構造物内部のひび検出も可能であるが、サブテラヘルツ波の波長はミリオーダーであり、電磁波としての発生源が点でなく空間があるために平行に成形するのは難しく、実現できていない。

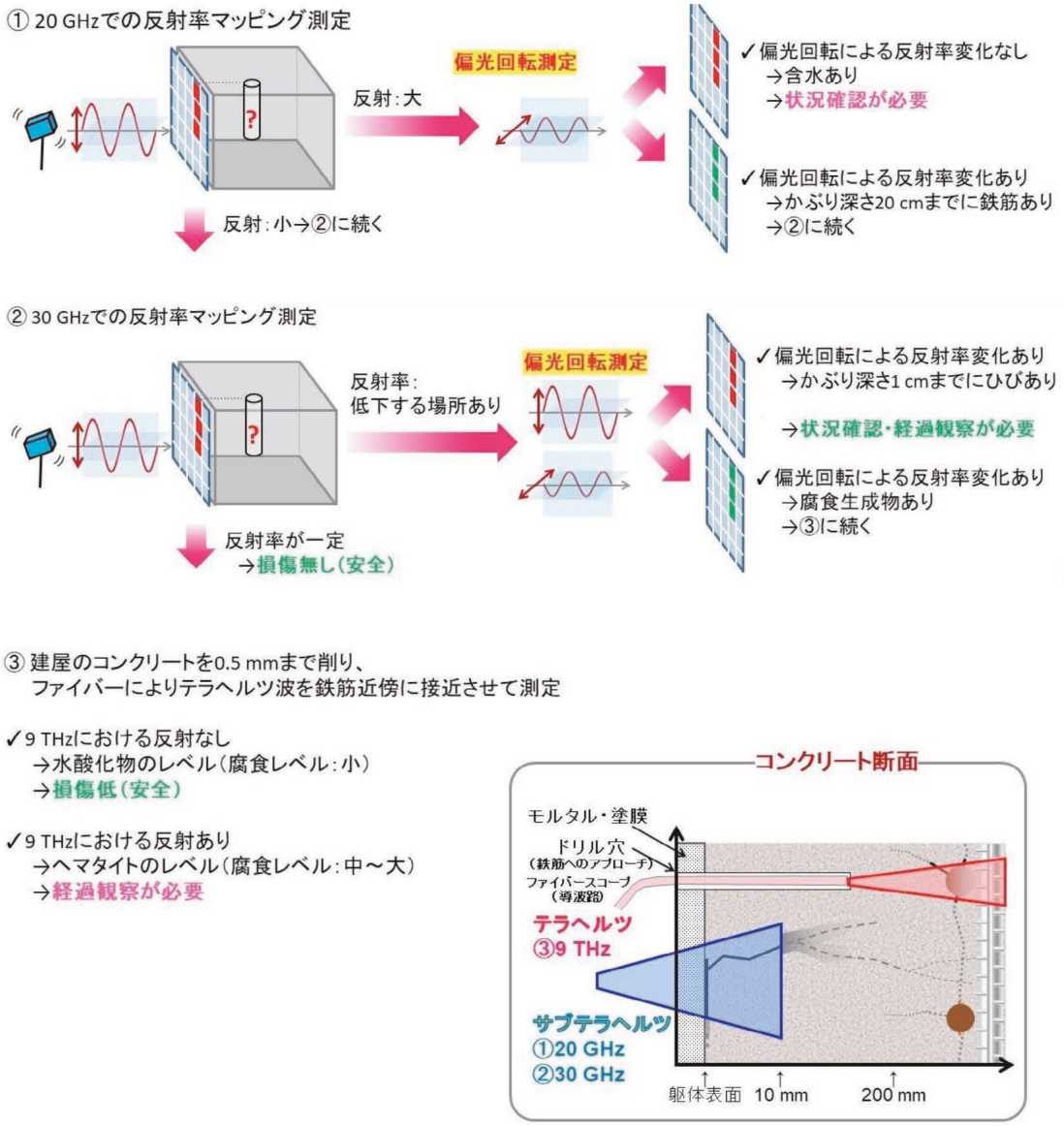


図 3.2.1-15　表層下にある損傷の近距離診断フロー

図 3.2.1-15 に示すようにサブテラヘルツ波が腐食層を往復する時、鉄腐食生成物は組成に応じて特有の吸収を示す周波数対があるので、腐食生成物を同定できるほか、腐食下にある金属表面からのサブテラヘルツ波ならびにテラヘルツ波の透過反射の光学系における吸光度に基づく腐食層の厚さの見積もりができる。ただ、腐食が十分厚い場合は、腐食層においてサブテラヘルツ波は吸収されるので、反射成分は検出されない。

なお、サブテラヘルツ波も透過能が高く、仕上げ材（表皮材）が非極性物質の塗膜であれば透過して、コンクリート内部に侵入するが、金属がシート程度の膜厚であっても表皮材として使用されていたり、コンクリート内部にあると、そこでサブテラヘルツ波は反射するので、それよりも内部にある情報の取得はできない。

サブテラヘルツ波ならびにテラヘルツ波のイメージング技術をより高度に理解するために、図 3.2.1-16 においてサブテラヘルツイメージングを同一の試験体に対する中性子イメージングと比較する。

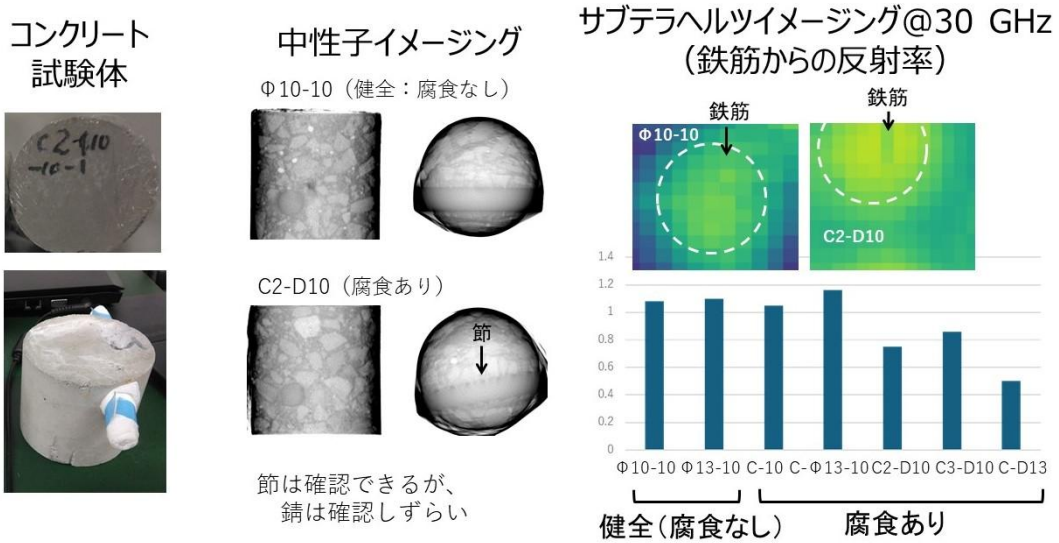


図 3.2.1-16　同一の試験体に対する中性子とサブテラヘルツによるイメージング

中性子イメージングで確認できるコンクリート試験体内部にある鉄筋の節や表層に生じた空隙をサブテラヘルツイメージングで検出することはできない。中性子イメージングと比較すると空間分解能が低いが、コンクリート内部にある鉄筋表面から反射は腐食により低下する傾向を確認した。30 GHz にて、鉄筋の影響が見られる箇所の反射強度の比較を行うと、鉄筋の太さや形状の異なるサンプルに対して安定して高い反射強度が得られるとともに（図中のφ10-10、φ13-10）、中性子イメージングでは検出できない腐食させた鉄筋部における反射強度の低下が見られた（図中の C2-D10、C-D13）。

3.2.2　サブテラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：木更津高専）

【令和 3 年度～令和 5 年度】

【令和 4 年度までの概要】

令和 3 年度は、以下の①、②及び③の項目を実施した。

① 計測システムの構築

サブテラヘルツからテラヘルツにおける複数の周波数でサンプルを走査することで反射と透過のイメージ像を任意のビーム径と偏光方向で得ることができる損傷検知システム（計測システム）を組み上げ、その動作を確認した。

遠隔診断を志向した光学系を図 3.2.2-1 に示す。周波数 30～95 GHz のサブテラヘルツ波を発生させる発振器及び検波器を設置した。レンズを用いて平行光を作り、遠隔計測に適用し得る設計にした。ハーフミラーを用いることで試験体に対するサブテラヘルツ波の反射と透過の情報を得られるようにした。光源は偏光特性を有しているため、発振器及び検波器の角度を変える、あるいは試験体の角度を変えることで偏光に関する情報を得ることが可能である。基礎データを得るために、サブテラヘルツ波を集光するレンズ、ビーム径を調整可能なアパーチャーを設計した。

距離可変ユニットを移動させ、動作確認を行った。特定の距離においては電磁波の干渉が生じたが、実験室レベルにおいては遠隔診断に向けた動作が確認できた。

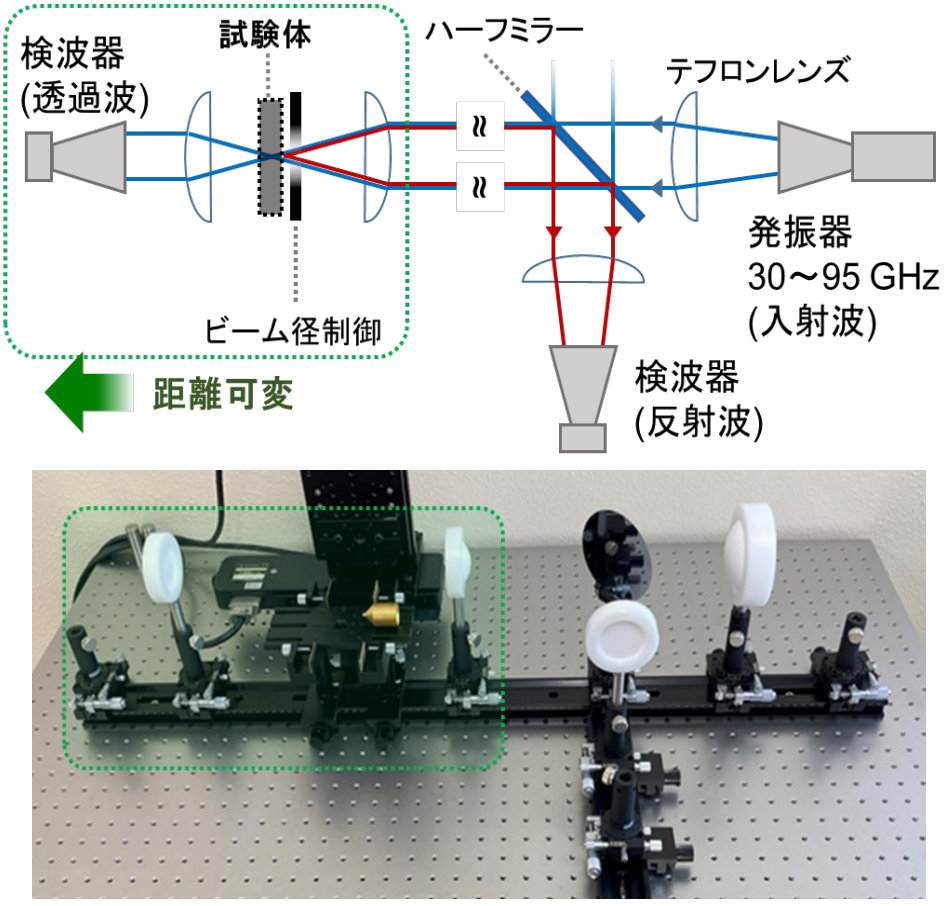


図 3.2.2-1　遠隔診断を志向した光学系の模式図（上）と外観（下）

② コンクリート構造物の基礎物性調査と遠隔計測に適用する周波数の検討

コンクリートの表層に形成されているモルタルやエポキシ等の各種塗膜に対する透過性を任意の厚さで系統的に評価するとともに、遠隔計測に適用する周波数を検討した。

テラヘルツ時間領域分光（Terahertz Time-Domain Spectroscopy：以下、THz-TDS という。）測定により、2 種類の塗膜材質における複素誘電率の周波数特性を調べた。100 GHz（0.1 THz）前後に、サブテラヘルツ波の損失を示すピークが見られた。材質によってピークの位置は異なるものの、25～60 GHz、125～500 GHz の周波領域においては損失が少なかった。すなわち、塗膜に覆われたコンクリートにおいて、サブテラヘルツ波が透過する周波数領域が明らかとなった。

遠隔診断においてはサブテラヘルツ波が大気中を伝搬するため、大気との相互作用を調べた。大気中の成分のうち、水蒸気との相互作用が大きいことが分かり、500 GHz～1.5 THz において強い吸収ピークがあることを実験的にも確認した。

③ 建屋全体の損傷を可視化する技術基盤の構築

従来からある CMOS カメラの可視像も取り込み、建屋全体の損傷を広いレンジで可視化できる損傷検知のための技術基盤（画像処理）の枠組みを構築した。ビーム径を制御するアパーチャーを用いて、サブテラヘルツ波の点分析データの位置情報と可視画像の位置情報を結び付ける処理が可能になった。

令和 4 年度は、令和 3 年度に構築した遠隔測定が可能であるシステムを用いて、中性子イメージング測定に適用する試験体と同様のコンクリート表面に対して評価を行った。試験体のサブテラヘルツ光源に対する距離を変化させた時の反射強度の 1 例を図 3.2.2-2 に示す。測定対象とする試験体までの距離が変化することで生じる干渉による強度振動が現れる。建屋に固定の金属板（反射率 100%）をリファレンスとする反射イメージングにもこのような干渉が現れることが想像され、反射率低減の原因が内部欠陥と干渉のどちらによるものか切り分ける必要がある。そこで、干渉を解消する解析アルゴリズムとして、干渉の周期に着目し、①極大値と極小値の 2 点平均による干渉除去と②各周期における全測定点の平均化の 2 つについて検討した。その結果、どちらの手法でも干渉を解消できることが分かったが、②の方法による全測定点での平均化は測定に時間を要するために、①の方法が遠隔測定に適する。

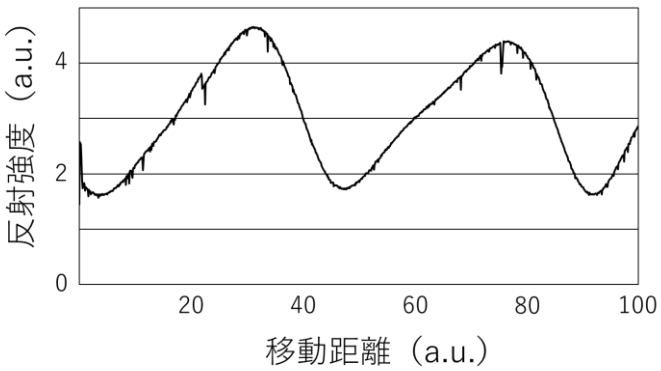


図 3.2.2-2　遠隔測定系においてサブテラヘルツ光源に対する試験体の各距離における反射強度

干渉除去のアルゴリズムとして極大値と極小値の 2 点平均化を適用し、各測定点において、サブテラヘルツ光源と試験体の距離を変調させることで極大値と極小値を測定して得られたイメージング像を図 3.2.2-3 に示す。イメージング測定の対象はコンクリート内部にある鉄筋を模擬し、厚さ 10 mm のコンクリート下に配置したコインである（図 3.2.2-3 (a)）。14 GHz のサブテラヘルツ光源を用いると、模擬鉄筋からの反射像が得られた（図 3.2.2-3 (c)）。一方、24 GHz の光源では干渉の影響から、反射像が得られたものの分解能が低い結果となった（図 3.2.2-3 (d)）。そこで、サブテラヘルツ光源 8～24 GHz、0.1 GHz 間隔でそれぞれ取得したイメージ像を平均化すると、干渉の影響を抑制した模擬鉄筋のイメージが得られた（図 3.2.2-3 (b)）。従来は電磁波の干渉が原因でコンクリート下の鉄筋（コイン）をイメージングで検出することは試験体位置により不安定であったが、複数の周波数データを活用した分光イメージングで測定するとともに、干渉除去アルゴリズムを適用することで鉄筋（コイン）を確実に検出できるようになった。遠隔操作では対象とする内部欠陥の位置が不明であるが、本アルゴリズムを遠隔イメージング測定に適用することで内部欠陥の安定な検出が期待できる。

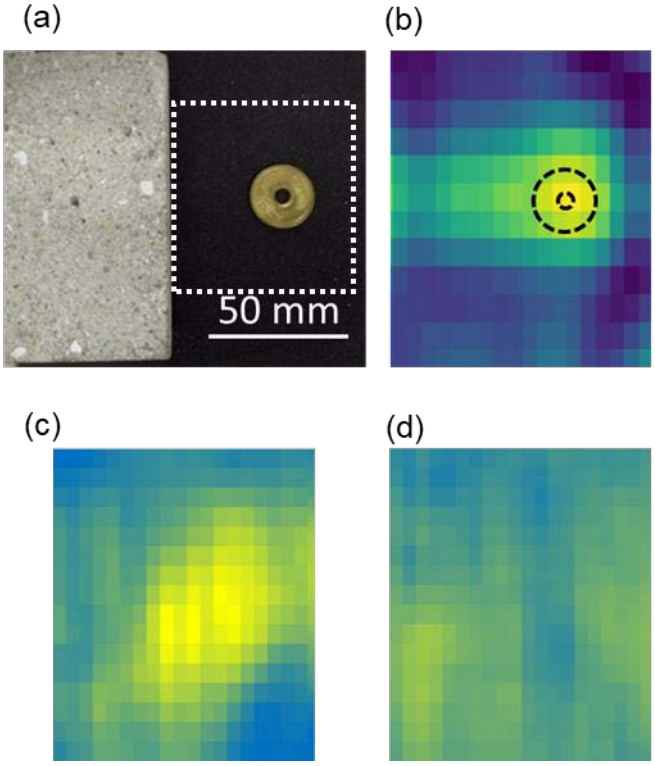


図 3.2.2-3　コンクリート下に隠れている模擬鉄筋（コイン）とそのイメージング
(a)コンクリート下に隠れている模擬鉄筋（コイン）と (b)サブテラヘルツ光源 8～24 GHz、
0.1 GHz 間隔でそれぞれ取得し平均化した分光イメージ像、
(c)14 GHz 及び(d)24 GHz の周波数でのイメージング

水分量を変化させたコンクリート試験体におけるペースト部の水分量を変化させた試料に対するサブテラヘルツ光源（60 GHz）の反射率と透過率を図 3.2.2-4 に示す。水分量が 13 wt%から 24 wt%に増加すると、反射率は 15.4%から 23.6%に増加した。一方で透過率は減少し、20 wt%以上の水分量ではほとんど透過しなかった。そのため、

含水試験片を含む試験体に対して、反射率の分光イメージング測定を行った(図 3.2.2-5)。含水試験片部分の反射率が高くなっていることが観測され、含水状態を検知する基礎技術の確認ができた。

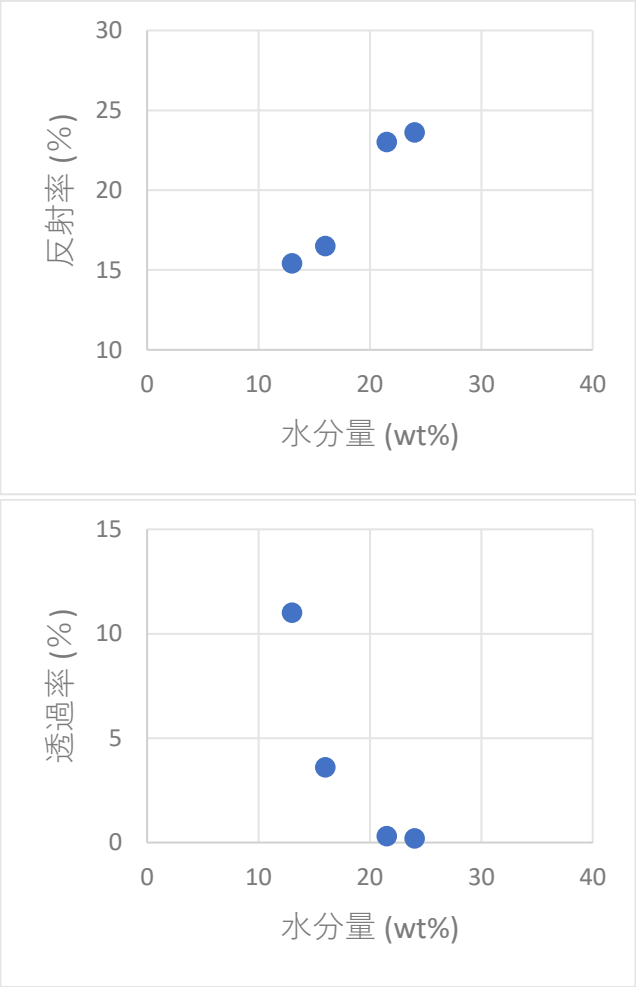


図 3.2.2-4　コンクリート試験体におけるペースト部の水分量を変化させた試料に対する 60 GHz の反射率と透過率変化

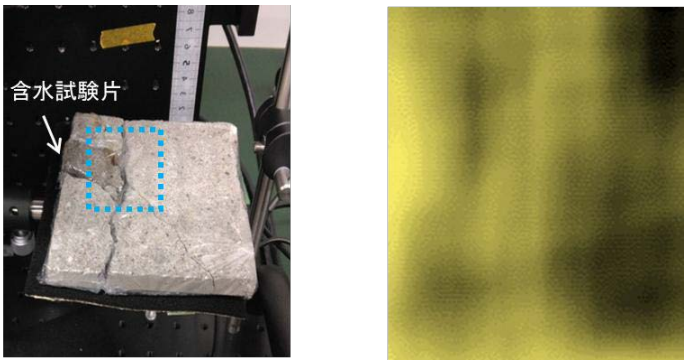


図 3.2.2-5　含水試験片を含む試験体画像（左）と反射率の分光イメージング（右）

鉄筋の腐食状態を変化させた試験体として、金属腐食のレベルによって構成される腐食生成物のα-FeOOH、α-Fe_2O_3を準備し、サブテラヘルツの反射率スペクトルを測定

した（図 3.2.2-6）。14～18 GHz にスペクトル形状の差が見られ、腐食状態を検知するために着目する周波数領域が明らかとなった。

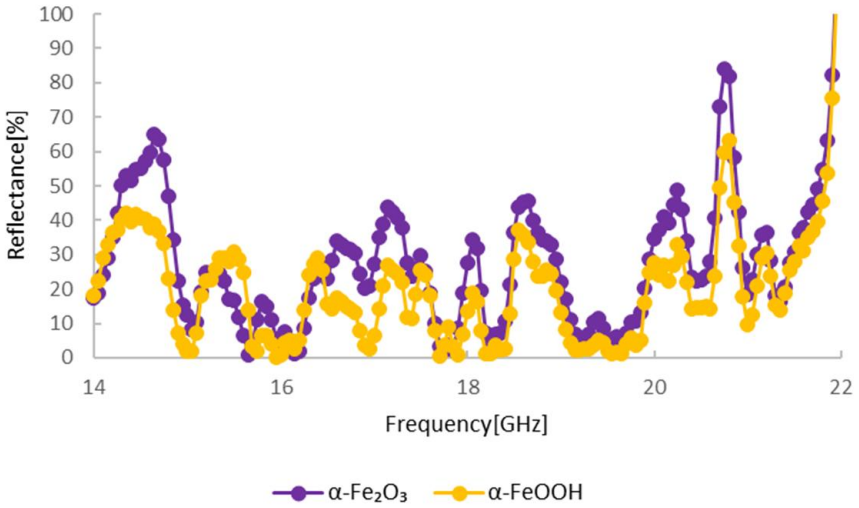
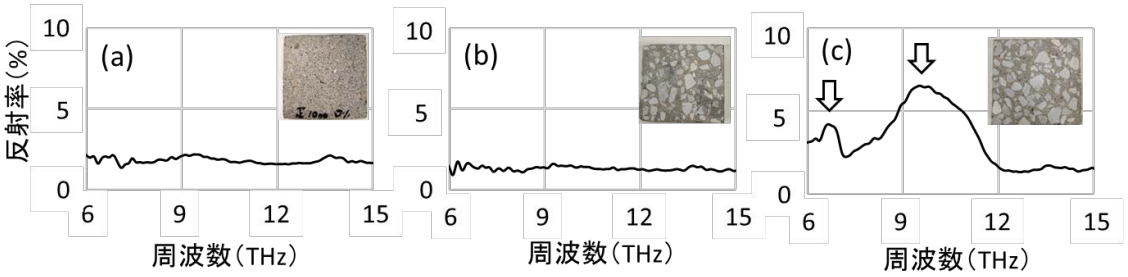


図 3.2.2-6　金属腐食生成物 α-FeOOH、α-Fe_2O_3 の反射率スペクトル

遠隔測定では直行性が高い高周波数による測定が有効であり、異なる腐食レベルに対応する試験体として、モルタルのほか、コンクリートは塩素濃度が 0%と 0.6%の全 3 種類の試験体を作製し、反射率を測定した（図 3.2.2-7）。低周波では反射率が 30%以下であり、塩素濃度に伴った反射率の差異が確認できなかったが、6.7 THz と 10 THz に塩素が存在することによる反射率の増大が確認された。その結果、遠隔測定による塩害の検出には 6.7 THz と 10 THz の 2 周波数を適用することが有効であることが分かった。なお、これらの試験体は膜厚を小さく 10 mm としたが透過強度を確認することはできなかった。



(a) モルタル、(b)塩素濃度 0%のコンクリート、(c)塩素濃度 0.6%のコンクリート
図 3.2.2-7　試験体表面からの反射スペクトル

サブテラ/テラヘルツ波により非破壊検出できる腐食状態を従来から知られている腐食反応・化学分析手法と対応させ、遠隔検査技術としての適用対象を整理した（表 3.2.2-1）。従来の手法において、はつり調査や電気化学計測による検査を実施するためには、基本的に構造物への接触や部分的な破壊を伴う。赤外分光、蛍光 X 線分光、ラマン分光においては非接触で実施可能であるが、構造物表層の情報を得るに留まり、内部情報を得るためには部分的な破壊を伴う。一方で、サブテラ/テラヘルツ波による

手法は適切な周波数帯に応じて鉄筋の腐食やコンクリート中の水分や塩分を検知でき、構造物の内部情報も含めた情報を取得し得る技術である。

表 3.2.2-1　コンクリート内部の鉄筋腐食を検知する手法の比較

検査技術	構造物への損傷・接触	腐食検知の遠隔診断		
		鉄筋腐食	コンクリート中の水分	コンクリート中の塩分
サブテラ/テラヘルツ	非破壊・非接触	○	○	○
はつり調査(目視)	構造物の破壊	×	×	-
電気化学計測(自然電位・分極抵抗)	接触・局所的な破壊	×	―	×
赤外分光	破壊(内部)	×	×	-
蛍光 X 線分光	破壊(内部)	×	×	×
ラマン分光	破壊(内部)	×	×	-

【令和 5 年度実施内容及び成果】

令和 5 年度は、コンクリート構造物の表面を移動して、サブテラヘルツ波の反射イメージング測定が遠隔操作できるシステムとして改良した。また、表層下にひびや含水部、内部の鉄筋腐食があるコンクリート試験体に対する測定を行った。視覚化のための解析アルゴリズム検討にデータを提供した。

遠隔操作システムとして、120 GHz の電磁波を照射する光源を用いた。コンクリート試験体（厚さ 130 mm）に対し、光源から距離を離した時の反射強度の応答を計測した。図 3.2.2-8 に実験の模式図、図 3.2.2-9 に反射強度の応答を示す。光源と試験体の距離が離れるに従い反射強度は減衰する傾向が見られた。ただし、13 m 離れた反射率の高い金属板からは反射強度のピークが計測された。このことから、光源の出力強度が改善できれば最大 13 m 離れた距離から計測可能であることが示唆された。以降の計測は反射強度の検出しやすさを考慮し、試験体表面から 1 m 離れた位置での計測評価を行った。

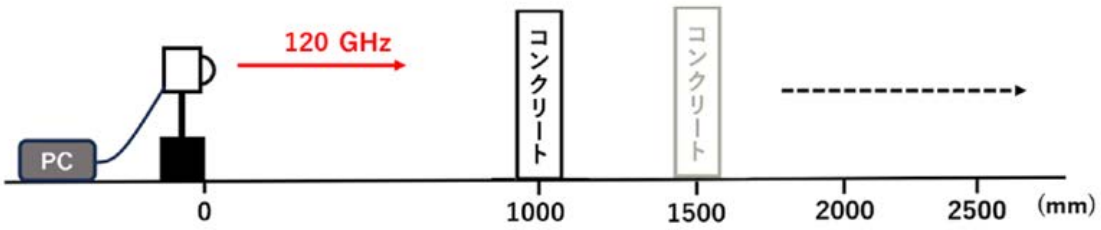


図 3.2.2-8　遠隔診断実験系の模式図

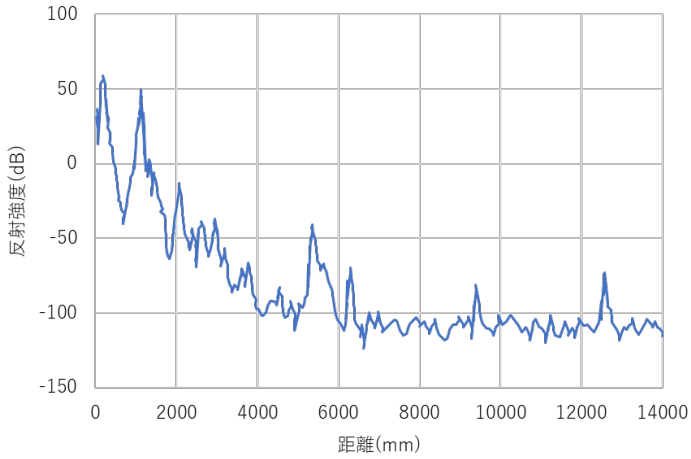
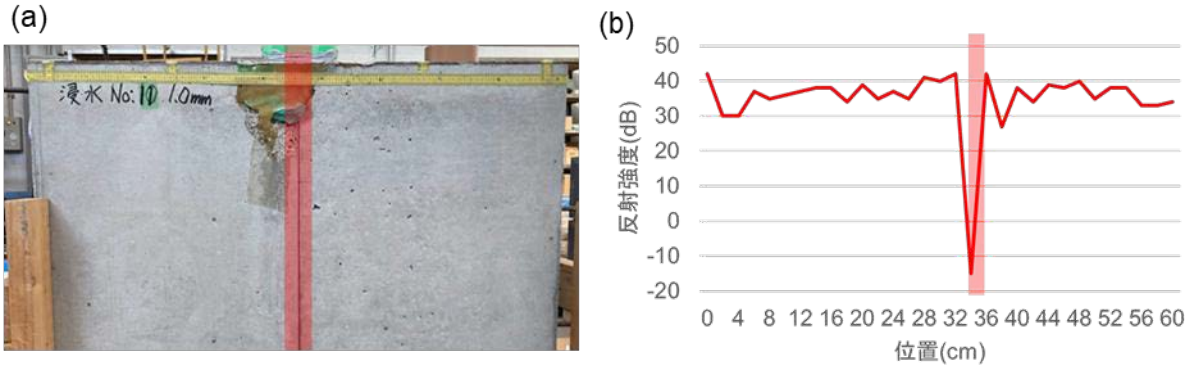


図 3.2.2-9　光源と試験体の距離と反射強度の関係

表層下にひびがあるコンクリート試験体表面（図 3.2.2-10(a)）に対し、120 GHz の電磁波を試験体の左から掃引照射し、反射強度の変化とその位置関係を計測した（図 3.2.2-10(b)）。ひび割れのないコンクリート表面からは 35 dB 程度の反射強度が計測された。一方、ひび割れ部において、反射強度が著しく低下した。このことから、改良したシステムにおいて遠隔からひび割れの損傷が検知し得ることが確認できた。



(a) 試験体の写真、(b)反射強度の変化とその位置関係

図 3.2.2-10　ひび割れ部を持つコンクリート試験体に対する電磁波（120 GHz）の反射強度変化

絶乾状態（含水率 0%）、気乾状態（含水率 3.0%）、湿潤状態（含水率 4.0%）の含水率の異なるコンクリート試験体に対して、120 GHz の電磁波の反射率を測定した。含水率が高くなるにつれて反射強度が高くなる傾向が見られた（図 3.2.2-11）。これは、空気に比べて水の屈折率が高いため、光がより効果的に反射されているためと考えられる。

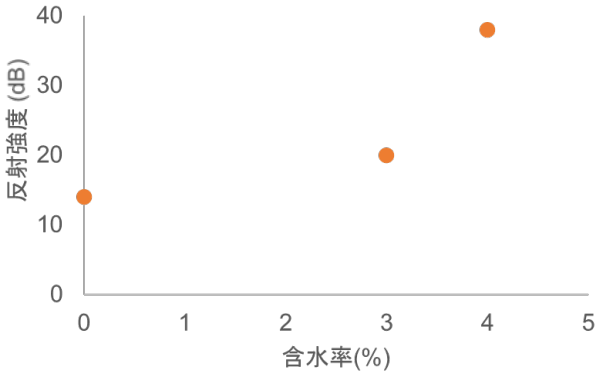


図 3.2.2-11　含水試験体に対する電磁波（120 GHz）の反射強度変化

コンクリート試験体に人工的に腐食させた鉄筋を含む試料（かぶり厚さ 30 mm）に対する測定を行った。鉄筋が入っている位置での反射強度に分かりやすい変化は見られなかった。これは、鉄筋の径（11 mm）に対して電磁波集光径が大きいことや、鉄筋から等方的に反射するため反射強度の変化が捉えにくいためだと考えられる。一方で、厚さ 130 mm のコンクリート試験体の後ろに腐食鉄板密着させて反射強度を計測すると、12 dB の減少が見られた。このことから、鉄筋の腐食を捉えるためには集光径を小さくする必要があることが分かった。

これらの取得したデータを、損傷検知を視覚化する解析アルゴリズム検討に提供した。

3.2.3　中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証（連携先：原子力機構）【令和 3 年度～令和 5 年度】

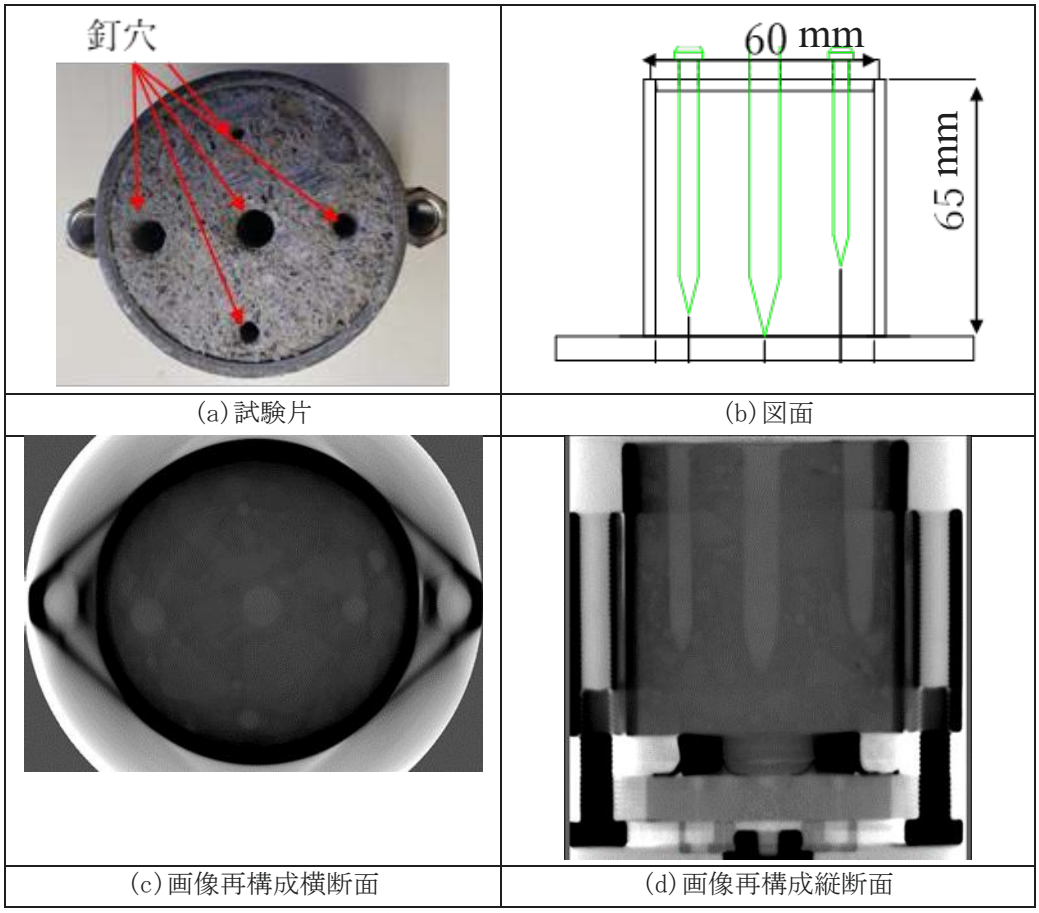
【令和 4 年度までの概要】

令和 3 年度は、以下の①、②及び③の項目を実施した。

① 中性子イメージング実験条件の決定

令和 4 年度及び令和 5 年度において、テラヘルツ波イメージング技術の検証に資する RC の内部 3 次元分布を非破壊で取得するために、JRR-3 の TNRF を使用した、RC 内部 CT 画像取得の条件出しを実施した。

図 3.2.3-1 に示すように、コンクリートに欠陥を模擬した釘穴を設けた試験体を用いて中性子イメージング測定条件を検討した結果、図 3.2.3-1(a)に示す模擬的に開けておいた穴が同図(c)及び(d)に示す画像再構成後の断面像においてはっきりと映っていることが確認されたことから、測定条件は 0.75　sec/0.3°　/枚を 600 枚撮像することで決定した。これにより測定時間は 1 時間で完了し、画像再構成の際に出現するアーチファクト(ノイズのようなもの)も発生せず、質の高い CT 画像取得が可能となる。また、この条件の内部欠陥の観測精度は 0.2 mm を得ることができた。



(a)試験片　(b)図面

(c)画像再構成横断面　(d)画像再構成縦断面

図 3.2.3-1　試験条件決定に用いた試験体の図と測定結果

② テラヘルツイメージング技術の検証に用いる RC 試験体の仕様の決定

テラヘルツイメージング技術の検証材料としてまずは、簡単なモデルから実施することとした。具体的な RC 試験体の仕様は、直径 100 mm×高さ 100 mm の円柱形を基本

とするブロックに切断面を入れて模擬ひび割れとしたものを製作して用いることとした。試験体の考え方については、電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発の担当者間で検討して決定した。具体的には、図 3.2.3-2 の上段に示すように 4 種類の 1 体物のコンクリート試験体（図中左上灰色、図中左中上濃灰色（中央切断）、図中右中上オレンジ色（30° 切断）、図中右上緑色（45° 切断））を用意し、切断面の隙間をコントロールすることで模擬ひびの間隔制御を図る。これらを、同図左下のように、ブロックを組み合わせて様々な条件の模擬ひび割れを構成して用いる。これにより、大型構造物中のコンクリート内部を模擬することが可能となり、テラヘルツレーダ測定技術の検証に応用することができる。令和 4 年度以降、中性子イメージングにおける観測限界評価にも適用する。

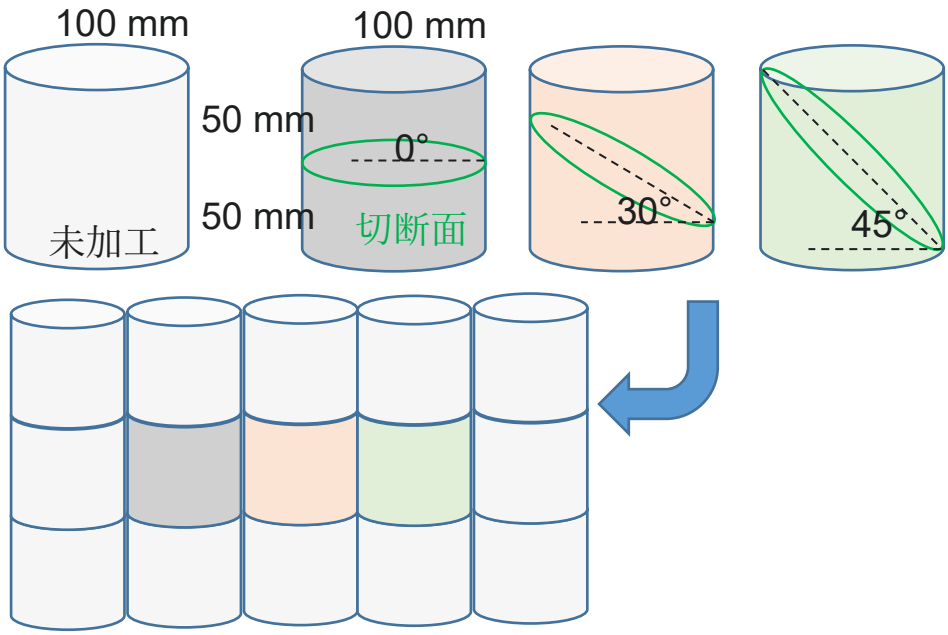


図 3.2.3-2　RC 模擬試験体の仕様の概念図

③ 中性子イメージング計測システムの高度化

試料に中性子を照射すると放射化する。これは素材によりその性質、減衰速度が大きく異なるが、減衰した際の放射線量がある一定の数値を下回らなければ試料の取り出しができない。そのため、減衰待ちの間は中性子イメージング計測が不可能となり、この時間が非常に無駄になってしまう。そこで、中性子イメージング計測の自動化を実施した。具体的には、50 cm 程度の並進ステージ上に試料小型回転ステージを複数設置することで、試料を一度にセットすることを可能とした。また、これらをコンピュータ制御することにより連続的に中性子イメージング計測が可能であることをオフラインでの撮像系の試験により確認した。

令和 4 年度は、令和 3 年度に決定した JRR-3 における中性子イメージング実験の条件及び RC 試験体の仕様に基づき、JRR-3 の TNRF を使用した中性子イメージング実験により、テラヘルツイメージング技術の検証に用いる RC 試験体内部のひび割れ位置とサイズを定量的に評価した。

令和3年度に決定したJRR-3における中性子イメージング条件は以下の通りである。
〇測定条件：0.75 sec/0.3° /枚×600枚
〇測定時間：1時間で測定完了
〇内部欠陥の観測精度：0.2 mm

また、令和3年度に決定したJRR-3における中性子イメージング実験の条件及びRC試験体の仕様は以下の3種類である。

1) 直径・高さ100 mmに対して45° 及び30° でカットした試験体を利用した模擬スリット導入試験体
2) ひび割れを導入した試験体
3) 鉄筋を入れた試験体

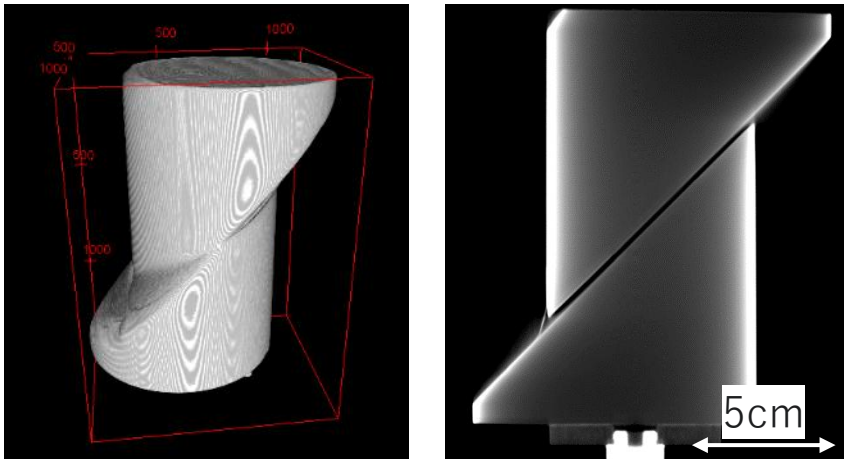
以下では、上述の3試験片に関する評価結果について報告する。

1) 直径・高さ100 mmに対して45° 及び30° でカットした試験体を利用した模擬スリット導入試験体

図3.2.3-3に、円柱形をカットして作製した試験体を示す。材質はモルタルで、写真は45° カットしたものを載せているが、これ以外にも30° カットしたものも用意した。中性子イメージングでは当該試験片の45° 切断面部に厚さ2 mm弱のアルミ箔を挟むことで模擬スリットを作り、CT画像取得を試みた。ただし、円筒のままとせず、カット方向に試験体をスライドさせることで非対称な試験体と模擬スリットを作り、CT画像取得を図った。

図3.2.3-3　カットした試験体

図3.2.3-4に、画像再構成により取得した模擬スリット導入試験体の3D像及び中央部断面像を示す。3D像では隙間は見えないが、外形がしっかり描かれている。一方、断面像では、2つのモルタルの間の模擬スリットがほぼ平行に存在していることが分かる。隙間の幅を算出したところ、平均1.9 mm程度であったことから、5%程度の精度で画像再構成されていることが分かった。

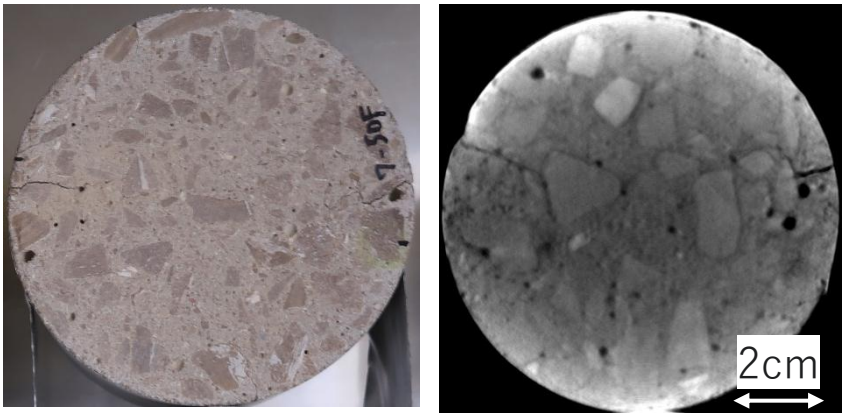


(a) 3D 像　　(b) 中央部断面像

図 3.2.3-4　模擬スリット導入試験体の 3D 像（左）及び中央部断面像（右）

2）ひび割れを導入した試験体

図 3.2.3-5 に、φ100 ㎜×50 ㎜厚のコンクリートを 600 ℃で熱処理してひび割れを導入した試験体の外観と、CT 画像より中央断面を切り出したものを示す。中央部断面像では、粗細骨材及びセメントがはっきりと観察できる。また、黒い点は空隙を示している。そして表面から内部に至るところに幅 1 ㎜程度のひび割れが複数観察されている。これは熱処理により、内部の水分が抜けた際に発生したものであると推察され、㎜オーダーの幅のひび割れについては非破壊でしっかり観察できることを確認した。



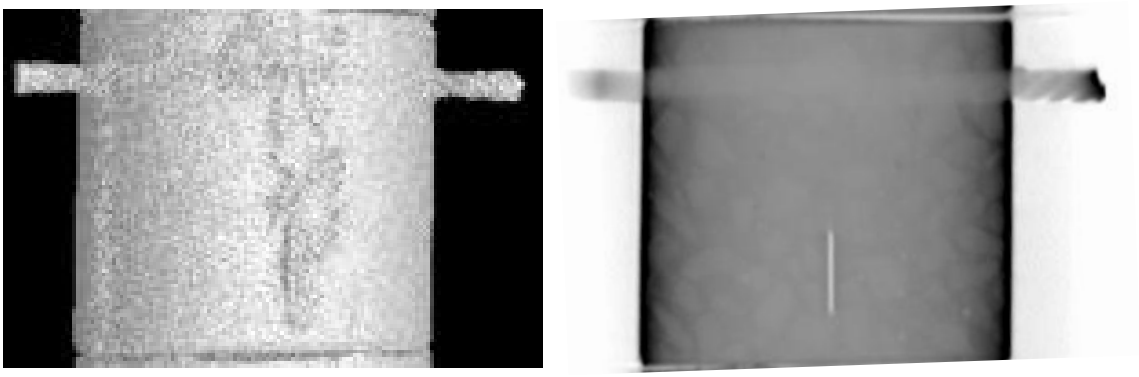
（a）試験体　　（b）中央部断面像

図 3.2.3-5　ひび割れを導入した試験体（左）及び中央部断面像（右）

3）鉄筋を入れた試験体

図 3.2.3-6 に、φ5 ㎜の鉄筋を横串したφ50 ㎜×50 ㎜長さのコンクリートの 3D 像及び CT 画像からの中央部断面像を示す。3D 像より表面に多少のムラを持つコンクリート、及びコンクリートからはみ出した鉄筋が明確に観察されている。一方、中央部断面像からはコンクリートに導入した幅 1 ㎜、高さ 10 ㎜のスリットが明確に観察されている。これに対して内部の鉄筋はかすかに見えている程度である。これは、コ

ンクリートと空気の中性子に対する透過率が大きく異なるのに対して、鉄筋の中性子に対する透過率がコンクリートとかなり近接しているためである。なお、別の研究においてφ10 mm 程度の鉄筋を含んだコンクリートの CT 画像では鉄筋がかなり鮮明に観察できていることから、鉄筋とコンクリートのサイズについては十分な検討が必要であると言える。



(a) 3D 像　　(b) 中央部断面像

図 3.2.3-6　鉄筋を入れた試験体の 3D 像（左）及び中央部断面像（右）

【令和 5 年度実施内容及び成果】

令和 5 年度は、テラヘルツイメージング技術の検証に用いる RC 試験体内部のひび割れ位置とサイズをより詳細に決定するために、JRR-3 の TNRF 等を使用した高分解能 3 次元中性子イメージング実験を行い、試験体内部にあるひび割れの位置とサイズ、深さを精密に測定した。また、上述した測定を通じて、様々な条件の RC 試験体について、多くの詳細なデータを蓄積した。

測定した試験体は、以下の 3 種類である。

1) 鉄筋を腐食させた試験体
2) 腐食させた鉄筋を含むコンクリート試験体
3) コンクリートで覆われた鉄筋の腐食を加速させ、ひび割れを発生させた試験体

以下では、上記 3 試験体に関する評価結果について報告する。

1) 鉄筋を腐食させた試験体

図 3.2.3-7 に、直径 50 mm×高さ 50 mm のコンクリート及び鉄筋を TNRF で測定している様子及び透過像を示す。なお、計測の際にはコンクリートからの粉が飛散しないように Al 箔で覆った状態で計測を行っている。透過像では Al 内部のコンクリート及び 2 種類の鉄筋が明確に観察されている。右図上部 2 本の鉄筋に対して右側は節形状が明確に観察され、左側では鉄筋の太さが下に比べて上が太いことが分かる。そして特筆すべきこととして、左側の鉄筋の側面部は腐食が発生しており、中央部に比べると側面部のコントラストが濃いことである。これは腐食が鉄筋に比べて中性子を吸収していることを意味している。図 3.2.3-8 は当該鉄筋の A 及び B の部分の CT 画像より作成した断層図及び透過強度を示したものである。図中の円形に着目すると、A の外周が濃くなっており、腐食部が鉄筋に比べて中性子の吸収が大きいことが分かる。グラ

フでは、〇で示したところで赤丸が青丸に比べて大幅に低い値を示していることから、この強度差を比較することで腐食を観察できる可能性があると言える。

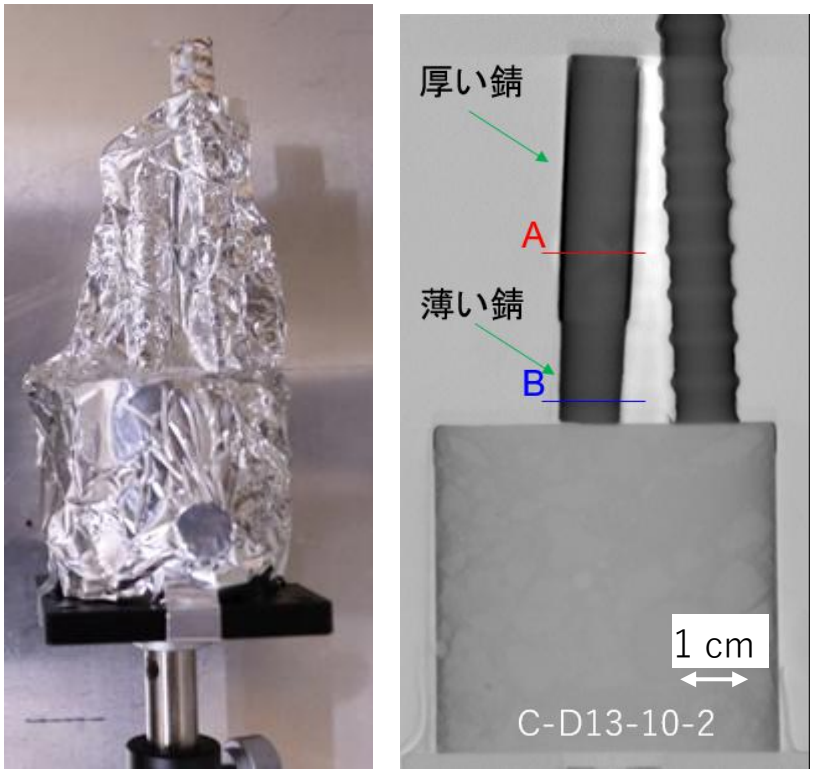


図 3.2.3-7　TNRF において計測している様子（左）及び透過像（右）

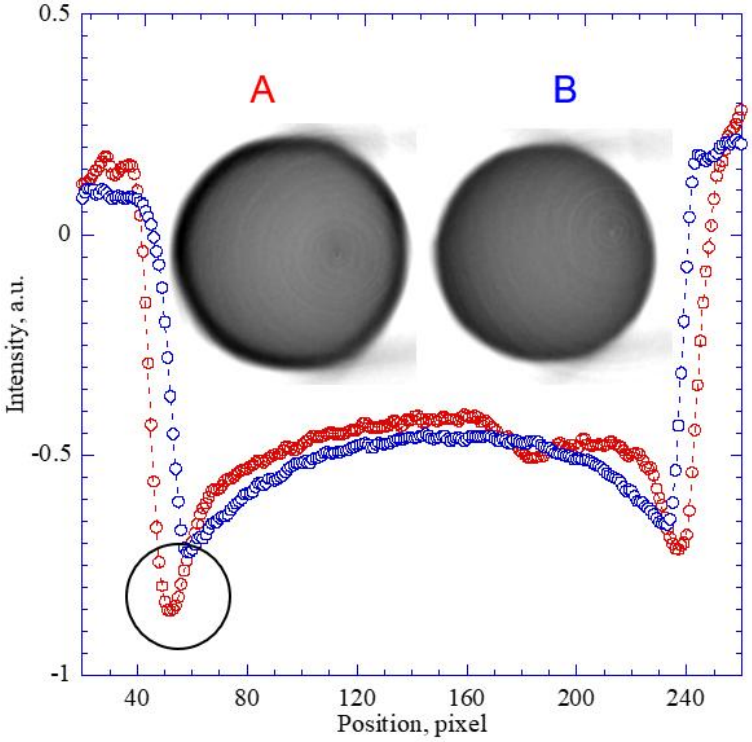


図 3.2.3-8　CT 断面像及び直径部分の透過強度変化

2) 腐食させた鉄筋を含むコンクリート試験体

図 3.2.3-9 に腐食させた鉄筋を含む直径 50 ㎜×高さ 50 ㎜のコンクリート試験体における CT 画像から切り出した中央付近の縦断面図（左）及び鉄筋上に示した C 直線部の透過強度比（右）を示す。コンクリート中の粗細骨材が非常に明確に観測されている中で円状の鉄筋もしっかり観測されている。一方、透過強度比については、左右の〇に注目すると、右の方が大きく強度比が減少している。これは腐食が発生しているためのものであると 1)の結果から推察され、ある程度の厚みのある腐食に対してはコンクリート中であっても十分観測できることを明らかにした。

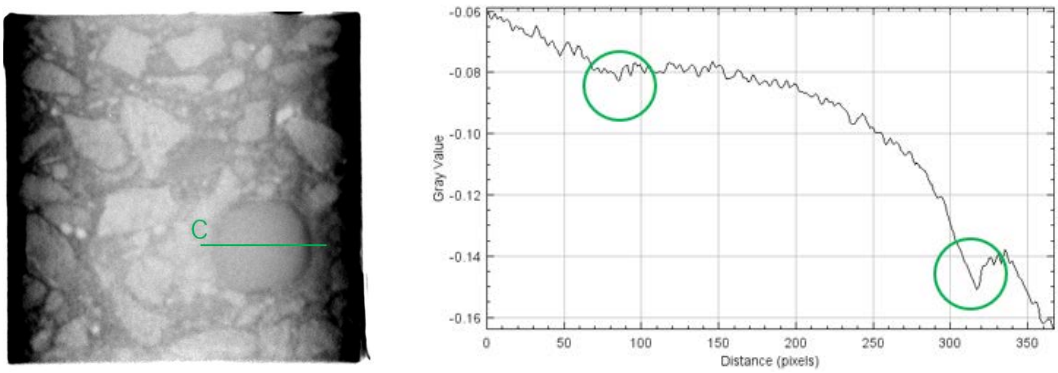


図 3.2.3-9　コンクリート CT 画像より作成した中央部縦断面（左）及び鉄筋付近の透過強度比（右）

3) コンクリートで覆われた鉄筋の腐食を加速させ、ひび割れを発生させた試験体

図 3.2.3-10 に、コンクリート試験体に挿入後、鉄筋の腐食を進行させた直径 50 ㎜×高さ 50 ㎜の RC 試験体における CT 画像から切り出した中央付近の縦断面図及び横断面を示す。表面から内部にかけて鉄筋腐食の増加に伴う体積膨張が原因と考えられるひび割れが横方向に広がっていることが観測されている。その幅は、約 1.5 ㎜程度であり、かなりジグザグに発生していることも分かる。

本測定では当該試験片のほかに 7 つの試験体についても計測を実施し、3 次元的に複雑に発生している割れの観測に成功している。当該結果はテラヘルツ計測にフィードバックされ、テラヘルツ計測の高度化に活用されている。

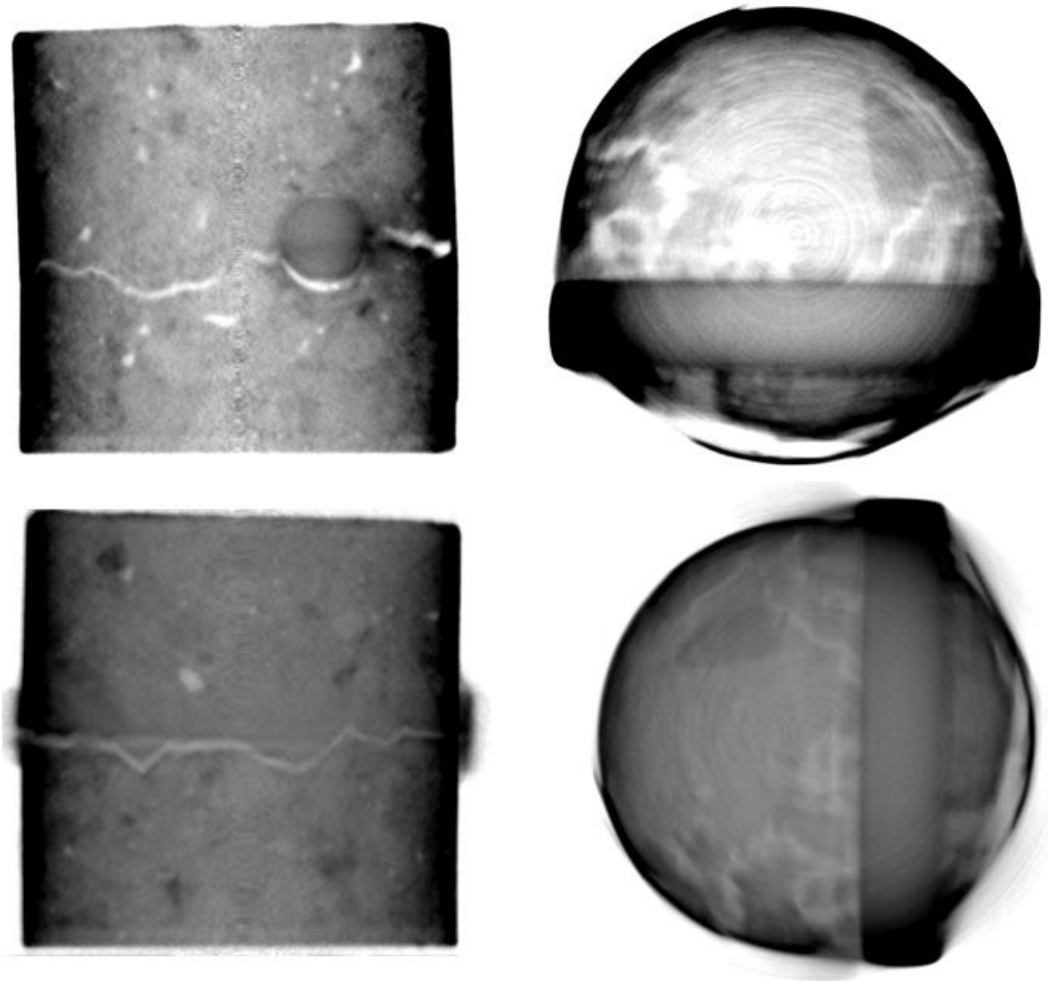


図 3.2.3-10　コンクリート内で腐食を加速させた試験体における縦及び横断面像

※　まとめ

(1) テラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：芝浦工業大学）

令和 3 年度は、サブテラヘルツからテラヘルツのいずれの周波数においても、光源と検出器を 1°刻みの回転機構に設置する治具を準備・使用することで、直径 4 ㎜以下のビーム径で偏光を回転させながら、反射と透過のイメージ像を測定できることを確認した。反射率と透過率の測定を 60 GHz の周波数において行い、偏光方向がひび割れと平行の場合、波長程度のひび割れ幅において、反射率と透過率ともに変曲点を取ることが分かった。偏光方向が垂直になると変曲点を示すひび割れ幅は広がる傾向があり、測定周波数を偏光方向と変調させたイメージ像から、ひびのサイズと方向を解析できることを実験的に確認した。

令和 4 年度は、中性子イメージング測定を適用した同一の試験体に対して、サブテラ/テラヘルツ波のイメージ像に変化を確認できるひび割れのパラメータを定量的に解析し、画像情報における検知精度を向上させる周波数帯ならびに偏光活用のデータ処理法を確立した。また、含水率だけでなく腐食生成物をはじめとするコンクリートの組成に対してサブテラ/テラヘルツ波の反射スペクトルを実験的に解析することで、内部損傷の検出精度向上に有効な測定周波数を解明した。

令和 5 年度は、サブテラヘルツ波ならびにテラヘルツ波により検知できる表層下にある損傷として、ひびのサイズや位置、水分ならびに腐食生成物の分布を対象に、測定手法や画像処理を含む解析方法を明らかにするとともに表にまとめた。サブテラヘルツ波による広範囲における遠隔診断も合わせて、テラヘルツ波による接近して詳細な損傷検知の活用方法を示した。

(2) サブテラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：木更津高専）

令和 3 年度は、サブテラヘルツ波を試験体に照射し、透過率と反射率が計測可能なシステムを設計するとともに、設置環境の計測システムでのサブテラヘルツ波の干渉がなく、設計通りのビーム径（1～4 ㎜φ）で偏光を回転させながら、反射と透過のイメージ像を測定できることを確認した。塗膜として 2 ㎜厚さのモルタルとエポキシについて、サブテラヘルツ波が透過することを確認し、遠隔計測に適用可能な周波数領域を 60 GHz 以下と特定した。サブテラヘルツデータの空間分解能である約 0.5 ㎜に整合する可視像を取得できる画像処理が可能であることを確認した。

令和 4 年度は、遠隔測定が可能であるサブテラ/テラヘルツ波の損傷測定システムを中性子イメージング測定と同一のひび割れを有する試験体に適用し、試験体までの距離とサブテラ/テラヘルツ波の反射率変化を確認した。また、異なる腐食レベルに対応する腐食生成物や水分に対する反射率と透過率のサブテラ/テラヘルツ波の分光イメージング測定を実施し、サブテラ/テラヘルツ波により非破壊検出できる腐食状態を従来から知られている腐食反応・化学分析手法と対応させ、遠隔検査技術としての適用対象を整理した。

令和 5 年度は、サブテラヘルツ波を遠方まで照射可能なシステムに改良した。コンクリート試験体をレールに乗せ、光源からの距離を順次離していき、その応答を計測した。ひび割れ、含水、鉄筋腐食をパラメータとした試験体に対して、データを取得した。これらのデータを、損傷検知を視覚化する解析アルゴリズム検討に提供した。

(3) 中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証

（連携先：原子力機構）

令和 3 年度は、中性子イメージング実験の条件の決定及び周辺機器等の整備を行うとともに、テラヘルツイメージング技術の検証に用いる RC 試験体の仕様を東北大学等と検討し、決定した。RC 試験体は、100 ㎜φ×100 ㎜の円筒形で、中心軸に対して垂直や斜めの切断面を入れたものを提案し、採用した。中性子イメージング実験条件は、CT 画像取得に際しては、0.75 秒/枚、0.3°/枚の条件で 600 枚の透過画像を得る条件に決定した。また、効率的に実験を進めるため、複数の試験体を自動で連続撮像するシステムに資する機器の購入及びシステム開発を実施した。

令和 4 年度は、令和 3 年度に決定した JRR-3 の TNRF における中性子イメージング実験の条件及び RC 試験体の仕様に基づき、中性子イメージング実験を行い、RC 試験体内部のひび割れ位置とサイズを定量的に評価した。斜め 45°にカットして約 2 ㎜の模擬スリットを作った試験体では、平均 1.9 ㎜の隙間を算出できた。また 600 ℃で熱処理した試験体では、幅 1 ㎜程度の亀裂が観察できた。φ5 ㎜の鉄筋を入れた試験体では、鉄筋とコンクリートの中性子の透過率が近接しているためかすかに見える程度であったが、別の研究ではφ10 ㎜程度の鉄筋を鮮明に観察できたことから、鉄筋とコンクリートのサイズについて検討が必要であることが分かった。

令和 5 年度は、RC 試験体内部のひび割れ位置とサイズをより詳細に決定するために、鉄筋の錆を加速的に成長させ、試験体内部にひび割れを発生させた試験体に対して、JRR-3 の TNRF 等を使用した高分解能 3 次元中性子イメージング実験を行い、内部のひび割れの位置とサイズ、深さを 0.2㎜程度の空間分解能で明らかにした。さらに、これらを含む、様々な条件で作製した RC に対して、試験体内部の鉄筋、空隙、骨材の位置の 3 次元画像データのほか、含水率を考慮した中性子透過率のデータを蓄積した。

以上のように、当該研究開発期間中には、

・中性子イメージングによる CT 計測技術の基盤基礎の構築

・コンクリートにおける含水率、割れの定量評価

・鉄筋の節、腐食の定量評価

を実施した。当該技術は、今後中性子イメージング利用の発展及び当該研究開発におけるテラヘルツ波イメージング技術の高度化に貢献するものである。

3.3　損傷探知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発
【令和 3 年度～令和 5 年度】

3.3.1　コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価【令和 3 年度～令和 5 年度】

【令和 4 年度までの概要】

令和 3 年度には、サブテラヘルツ反射波を用いてコンクリート表面あるいは内部の埋設鉄筋や欠陥を模擬した測定を実施した。

- 周波数が 30、50 GHz のサブテラヘルツ反射波を用いてコンクリート、モルタル、セメントペーストを測定した結果、骨材とモルタル部で反射率に違いがあることを確認した。
- 差分反射率により評価することで、試験体厚さ 30 mm までの範囲では、埋設鉄筋を模擬して試験体裏面に設置した Al テープの検出が可能であった。
- ひび割れを模擬したスリットを有する試験体の測定では、2 mm 以上のスリット幅について検出が可能であった。
- 仕上げ材を模擬した厚さ 5 mm のモルタルを試験体表面に設置した測定では、30 GHz を用いた場合にモルタル裏面のスリットを検出可能であった。
- 加熱により力学性能を低下させた測定では、性能低下前後の反射率の比によって、圧縮強度の低下を評価できる可能性を示した。周波数 30 GHz において、より明確な相関を得た。

令和 4 年度には、サブテラヘルツ反射波を用いてコンクリート表面あるいは内部の埋設鉄筋や欠陥を模擬した測定を実施した。

- ひび割れをはじめとする劣化を導入して力学特性を低下させたコンクリート試験体に対してサブテラヘルツ波イメージング技術による測定を行い、導入した劣化状態（力学特性）との関係を得た。
- 高温加熱試験及び急速凍結融解試験と異なる機構により強度や弾性係数の力学特性が低下した場合であっても、サブテラヘルツ反射率の変化率と力学性能の変化率の関係を得ることができた。サブテラヘルツ反射率の計測結果からコンクリートの力学性能の変化率として計測できる可能性が示唆された。
- サブテラヘルツカメラを利用してのサブテラヘルツ波イメージング測定について検討を行い、広範囲のリアルタイム測定が可能になることが示唆された。
- ただし、予備実験の結果、周波数が 1 THz 以上のテラヘルツ波を用いた場合は一般的なかぶり厚さよりも薄いコンクリートであっても十分な情報の取得が困難であることが確認されたため、上記の検討は周波数が 0.05 THz（50 GHz）以下のサブテラヘルツ波を用いて実施した。

【令和 5 年度実施内容及び成果】

(1) はじめに

ここでは、1F 建屋で想定される環境的・力学的作用などによって力学特性が低下した場合のコンクリートについて、内部劣化状態をテラ（サブテラ）ヘルツ波イメージング技術を用いて測定を行う。ここで得られた測定結果を解釈することで、劣化の状態からコンクリートへと変換するための方法を検討し、後述の「材料劣化特性に基づく部材の耐震性能評価（課題 3.3.3)」において FEM 解析に適用できる関係式として示すことを目的とする。

なお、以下の検討では令和 4 年度までに実施した実験結果を受けて、周波数が 1 THz 以上のテラヘルツ波を用いた場合は一般的なかぶり厚さよりも薄いコンクリートであっても十分な情報の取得が困難であったため、以下の検討では周波数が 0.05 THz（50 GHz）以下のサブテラヘルツ波を用いて実施した。

(2) 実験概要

① 試験体概要

ここでは、力学性能を段階的に低下させたコンクリート試験体に対してサブテラヘルツ波を用いたイメージング測定を行った。令和 4 年度に検討を行った、液体窒素を用いた急速凍結融解試験により段階的に劣化を導入したコンクリート試験体と同様のものを用いた。ここでは、性能低下の段階をより詳細に区分できるように試験体を調整するとともに、圧縮強度に加えてヤング係数・動弾性係数の計測を行った。また、サブテラヘルツ波イメージング測定については、後述のように周波数を連続的に変化させることでより詳細な情報を取得した。

試験体に用いた使用材料として、セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm^3、比表面積 3,140 cm^2）を用いた。細骨材には、砕砂（表乾密度 2.66 g/cm^3）及び陸砂（表乾密度 2.62 g/cm^3）を混合して用い、粗骨材には砕石（表乾密度 2.68 g/cm^3、最大寸法 20 mm）を用いた。ここで、試験体の形状を直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱状としたため、粗骨材はふるいによって最大寸法が 13 mm 以下として選別したものを用いた。また、混和剤として AE（Air Entraining：空気連行）減水剤（密度 1.05 g/cm^3）を使用した。表 3.3.1-1 に用いた調合表を示す。

表 3.3.1-1　調合表

単位量（kg/m^3）				
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
199	306	979	734	0.09

② 急速凍結融解試験による劣化の導入

作製したコンクリート試験体に対して、セメントペースト部分の化学的な変質を抑制しつつ、任意の性能低下を段階的に制御しながら与えることを目的として、凍結融解試験により劣化を生じさせた。ただし、一般的に用いられる日本産業規格（Japanese Industrial Standards：以下、JIS という。）JIS A 1148（A 法）に代表される凍結融解試験の場合、劣化が顕在化するまでには 100 サイクル以上（AE コンクリートの場合には 300 サイクル以上）を経ても相対動弾性係数（耐久性指数）が 90%以上を維持することもあり、求める性能低下を得るためには数ヵ月に亘る長期間が必要となる可能性があるため、令和 4 年度に引き続き液体窒素を用いた急速凍結融解試験を採用した。既往の研究[3.3.1-1]によると、AE コンクリートの場合であっても 10 サイクル程度で相対動弾性係数を 60%程度まで低下させることが可能であり、1 日で実施できる。

急速凍結融解試験の手順及び測定項目を図 3.3.1-1 に、試験に用いた装置を図 3.3.1-2 に示す。液体窒素断熱容器の内部にコンクリート試験体を設置し、ここに液体窒素を注入して 2 分間コンクリート試験体を浸漬させ、試験体中心部が-100 ℃程度になるまで急速に冷却する。その後、40 ℃の温水中に試験体を投入して融解させることで 1 サイクルとなる。凍結融解試験が行われた試験体には、JIS A 1127 を参考に、縦

振動の計測を行って 1 次共鳴振動数を求めて、動弾性係数E_Dを算出した。この算出には、下記に示す式(3. 3. 1)を用いた。

$$E_D = 4.00 \times 10^{-3} \frac{L}{A} m f^2 \qquad \text{式(3. 3. 1)}$$

ここで、L（mm）は試験体の高さの長さ、A（mm²）は試験体の断面積、m（g）は試験体の質量、f（Hz）は 1 次共振周波数を示す。凍結融解試験を行う前の試験体で測定された動弾性係数を 100%として、劣化を与えた試験体での動弾性率を相対比として算出し、相対動弾性係数を求めた。相対動弾性係数は劣化の進行に伴って低下するため、これを劣化の程度を示すパラメータとして用いる。

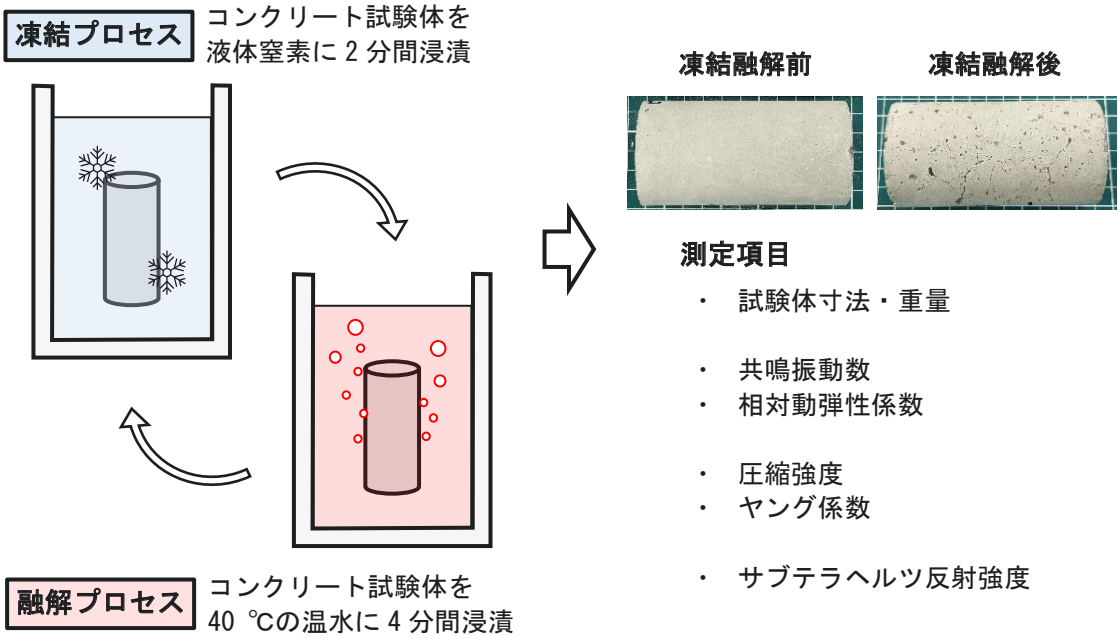


図 3. 3. 1-1　急速凍結融解試験の手順と測定項目

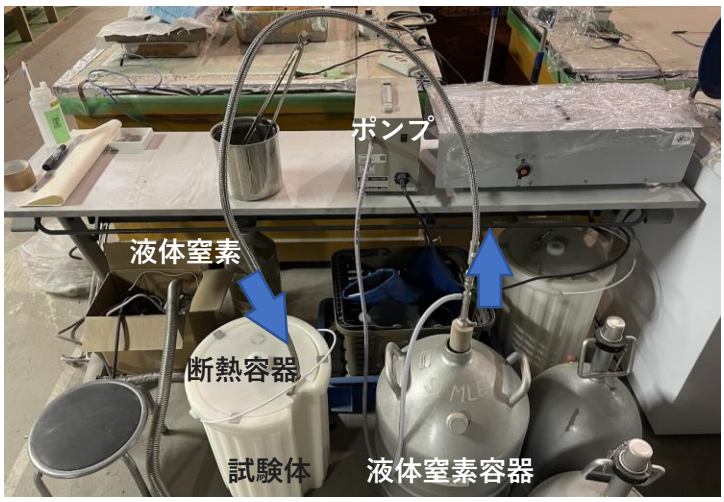


図 3. 3. 1-2　急速凍結融解試験装置

③ 力学特性の確認実験

コンクリート試験体の力学特性について、圧縮強度試験を行って圧縮強度及びヤング係数を取得した。圧縮強度試験中に生じるひずみは、コンプレッソメーターを用いて測定した。ヤング係数は JIS A 1149 に規定されるように、最大圧縮強度の 1/3 の範囲で計算した。ただし、劣化が生じている場合には、直線と見做せる部分の傾きとして求めた。載荷速度は、JIS A 1108 では毎秒 0.6±0.4 N/mm^2 と規定されているが、ここでは力学性能が低下した状態での試験を含むため、毎秒 0.2 N/mm^2 を目標として制御した。

④ サブテラヘルツ計測

ここで用いたサブテラヘルツ測定系は、図 3.3.1-3 のように反射波によるものとした。サブテラヘルツ波の光源には可変周波数に対応できるものを用いて、20～50 GHz の周波数帯において、可能な限り連続的に 0.02 GHz ごとの周波数を変化させた。計測系としては、この光源のほかにサブテラヘルツ波の集光するためのテフロンレンズを用いた。試験体は、電磁波吸収体を周囲に設置した上でステージ上に設置した。試験体の側面を測定対象として、試験体の反射強度からノイズ（試験体を置かない場合の反射強度）を差し引いた値を金属板の反射強度で除した反射率を用いた。

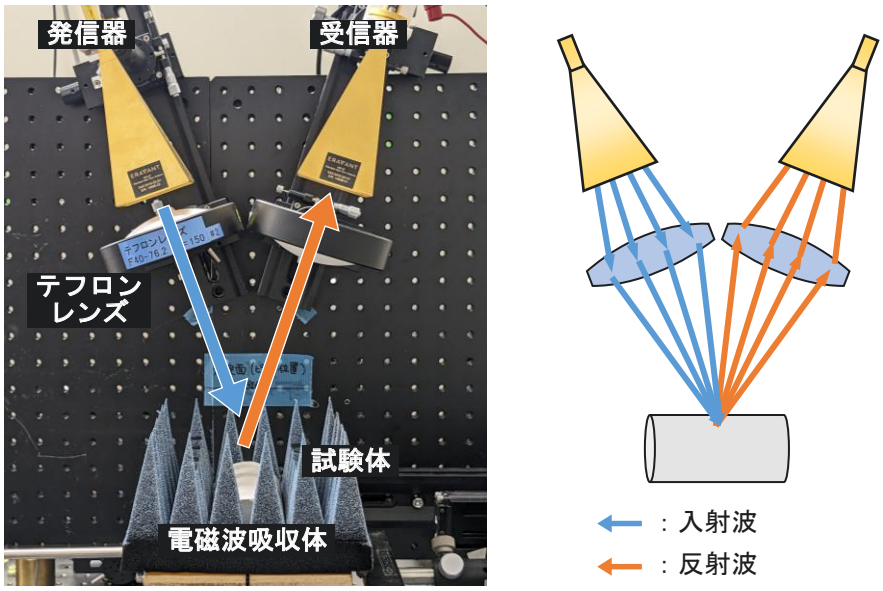


図 3.3.1-3　サブテラヘルツ計測の概要

(3) 実験結果

① 急速凍結融解サイクルによる力学特性の変化

図 3.3.1-4 に、円柱状試験体に対して急速凍結融解サイクルを与えた上で、圧縮強度試験を行った際のひずみと応力の関係を示す。凡例に示す数値は、対応する相対動弾性係数の値である。この図のように、急速凍結融解サイクルによって段階的に力学特性を低下させることが可能であった。図 3.3.1-5 に、凍結融解サイクル数と圧縮強度の関係を、図 3.3.1-6 と図 3.3.1-7 には凍結融解サイクル数とヤング係数及び相対動弾性係数の関係をそれぞれ示す。これらの図から、凍結融解サイクル数の増加に伴って劣化が段階的に進行して圧縮強度が低下し、初期ひずみが増加してヤング係数も低下しているこ

とが確認できる。このような挙動の変化は、凍結融解サイクルによって生じた微細なひび割れが生じたためと考えられる。初期ひずみの増加は、荷重が加わることによってこれらのひび割れが閉塞することに伴うもので、閉塞後には一定の直線的な傾きが確認できる。また、圧縮強度はサイクル数の増加に伴って直線的に低下する傾向が見られる一方、ヤング係数と相対動弾性係数はいずれもサイクルが小さい段階から大きく低下することが確認できる。圧縮強度は約 20%の低下が見られる一方で、ヤング係数と相対動弾性係数はいずれも 20%まで大きく低下している。

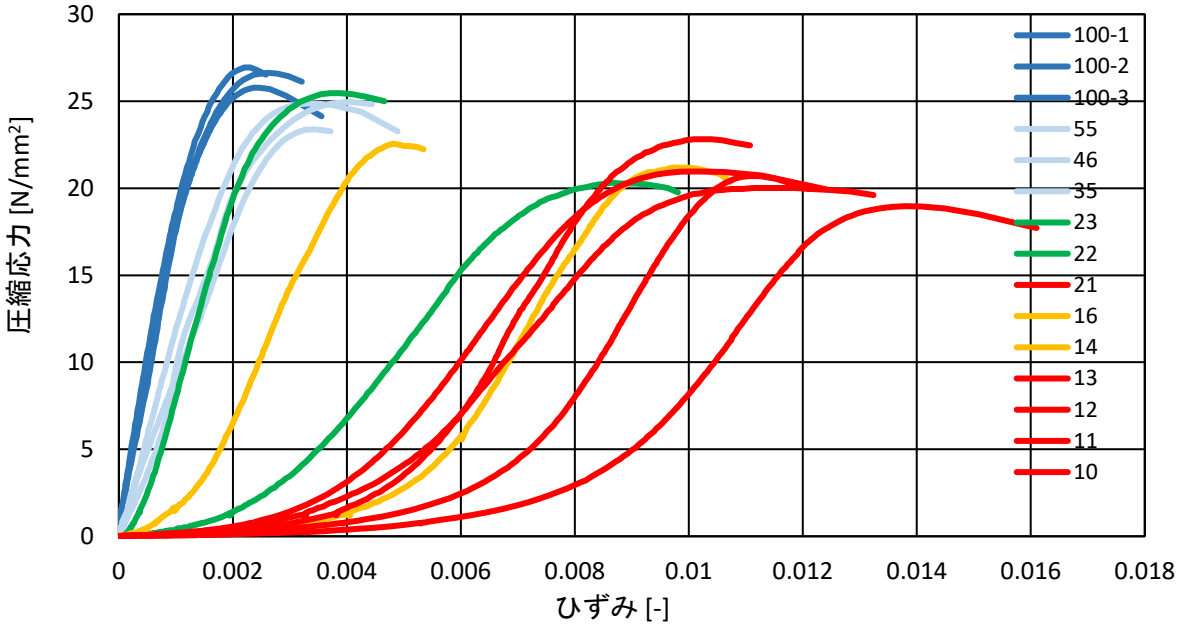


図 3. 3. 1-4　急速凍結融解サイクルを与えたコンクリートの応力とひずみの関係

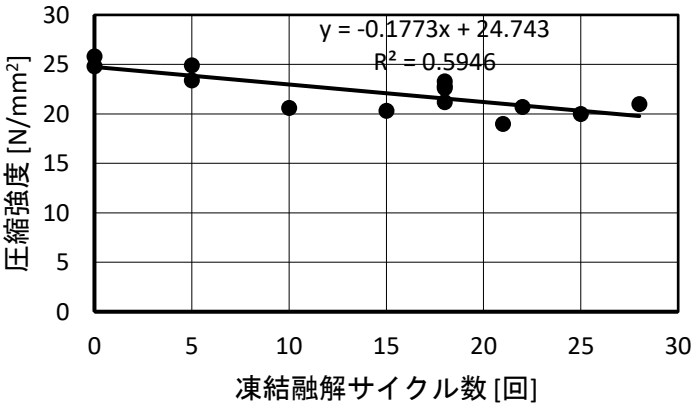


図 3. 3. 1-5　急速凍結融解サイクル数と圧縮強度の関係

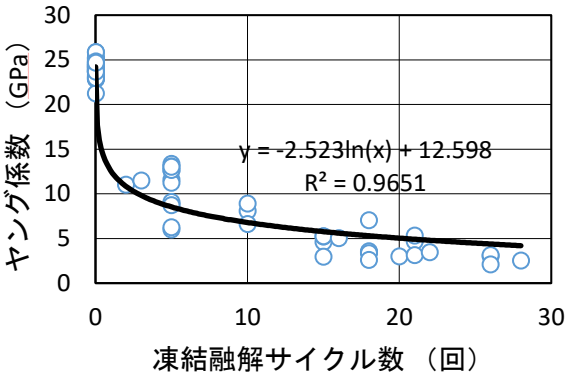


図 3.3.1-6　急速凍結融解サイクル数と
ヤング係数の関係

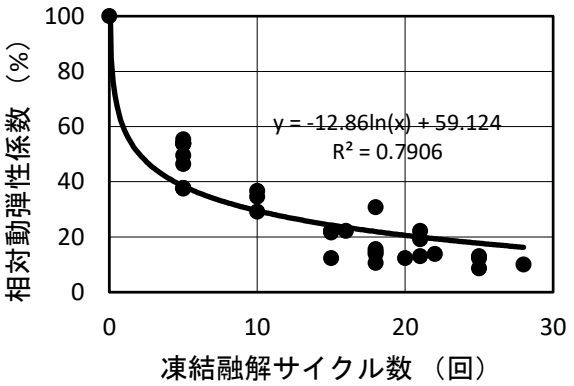


図 3.3.1-7　急速凍結融解サイクル数と
相対動弾性係数の関係

② サブテラヘルツ波イメージング測定と力学特性の関係

サブテラヘルツ波イメージング測定によって得られた、周波数と反射強度の関係を図 3.3.1-8 に示す。ただし、ここでは周波数ごとの測定結果を詳細に記述するため、画像化は行わずに 1 点での測定結果を示している。また、図 3.3.1-9 及び図 3.3.1-10 には、ここで用いた 20～50 GHz の周波数の範囲全体の平均として得た反射強度と、圧縮強度及びヤング係数の関係をそれぞれ示す。図 3.3.1-8 から、急速凍結融解試験の前後においても、周波数ごとの反射強度は同じ傾向を示した。すなわち、同じコンクリート材料を用いた試験体を用いる場合には、周波数の違いによって反射強度の大きさに一定の傾向が見られることが確認できた。周波数全体の平均値を用いて表した図 3.3.1-9、図 3.3.1-10 からは、反射強度と力学性能の間に明確な傾向は確認できなかった。令和 4 年度までの検討では、ひび割れの発生に伴って反射強度が低下する傾向が見られる場合があった。後述するように、特定の周波数では同様の傾向が見られた一方で、全体の平均値とした場合には周波数ごとの傾向が相殺されてしまうために、一定の傾向とはならないと考えられる。既往の検討においても、周波数を細分化して計測した場合には、周波数ごとに異なる傾向が見られることが確認されており[3.3.1-2]、本検討においても同様の傾向が見られたものと考えられる。このことは、サブテラヘルツ波の反射強度はひび割れだけに留まらず、コンクリートの構成材料[3.3.1-3]や含水率[3.3.1-4]、塩化物イオン量[3.3.1-5]など多くの因子によって影響されるためと考えられる。この一方で、特定の周波数に細分化して着目した場合には、たとえば図 3.3.1-11～図 3.3.1-14 に示すように、一定の線形関係を得られる場合が確認できる。すなわち、特定の周波数を選定した上でサブテラヘルツ波による測定を行うことで、力学性能の低下と反射強度の関係を得られるものと考えられる。例示した 34.8 GHz や 45.8 GHz などの特定の周波数は、ここで実施したような周波数を連続的に変化させた測定により得られるものであり、測定方法のキャブレーションが必要であることを示している。

今回の実験の範囲では、20～50 GHz のスペクトル測定を行うことで、34.8 GHz や 45.8 GHz などの特定の周波数を選択して測定方法をキャリブレーションすることが可能となり、これらの周波数を用いて測定した反射強度から力学性能の低下の程度への換算が可能であることが確認された。

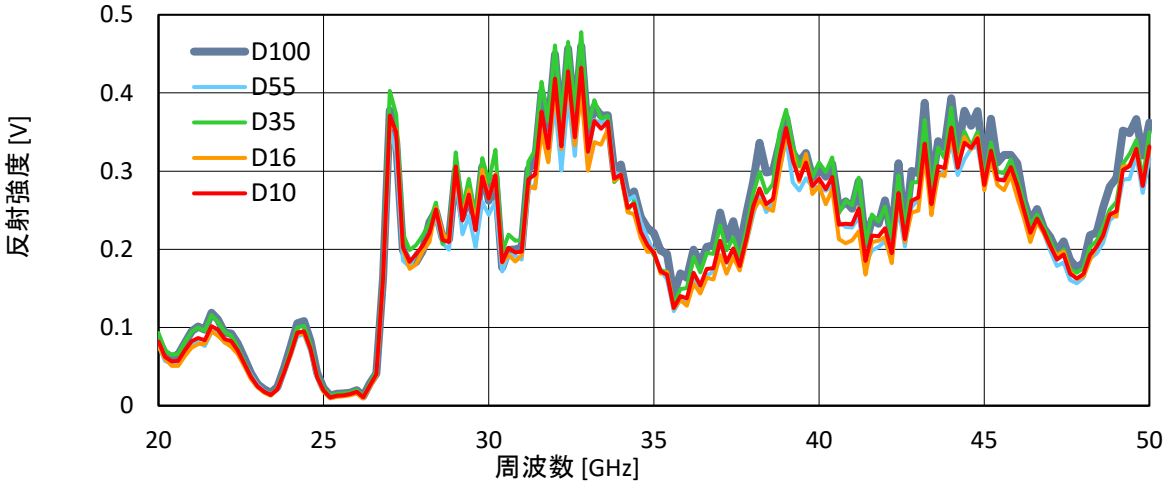


図 3. 3. 1-8　周波数と反射強度の関係

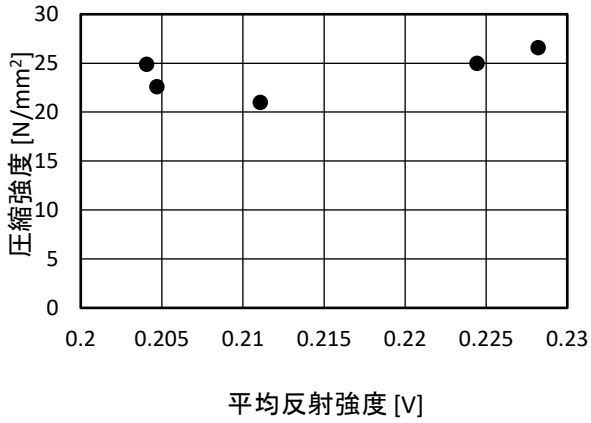


図 3. 3. 1-9　平均反射強度と圧縮強度の関係

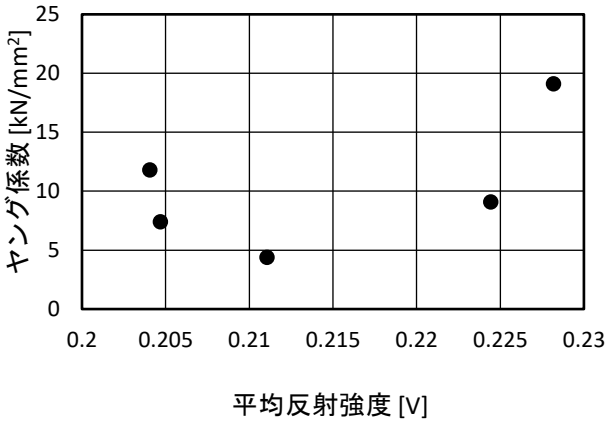


図 3. 3. 1-10　平均反射強度とヤング係数の関係

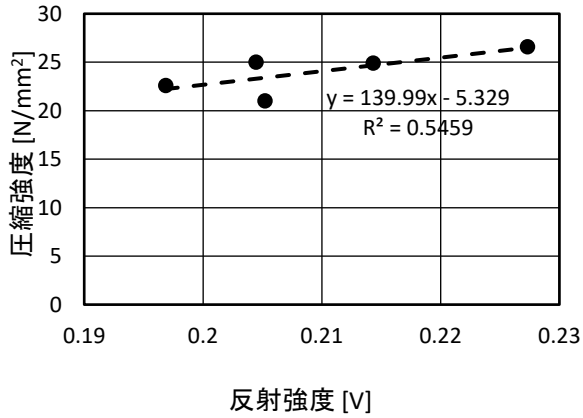


図 3. 3. 1-11　反射強度と圧縮強度の関係
(34. 8 GHz)

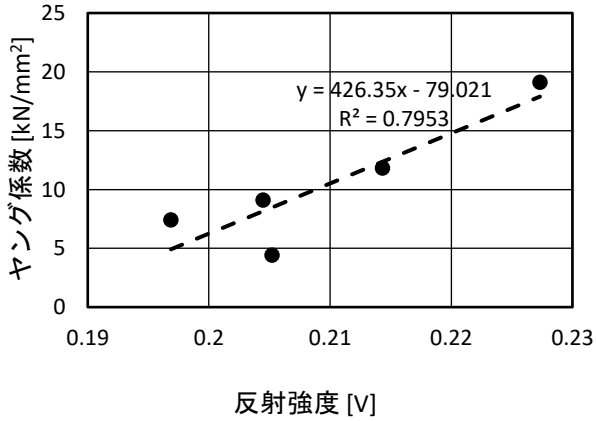


図 3. 3. 1-12　反射強度とヤング係数の関係
(34. 8 GHz)

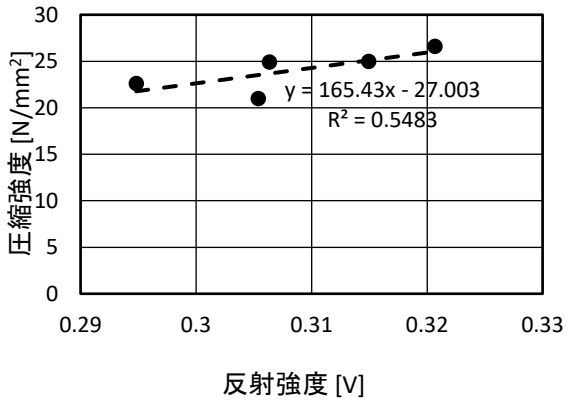


図 3.3.1-13 反射強度と圧縮強度の関係
(45.8 GHz)

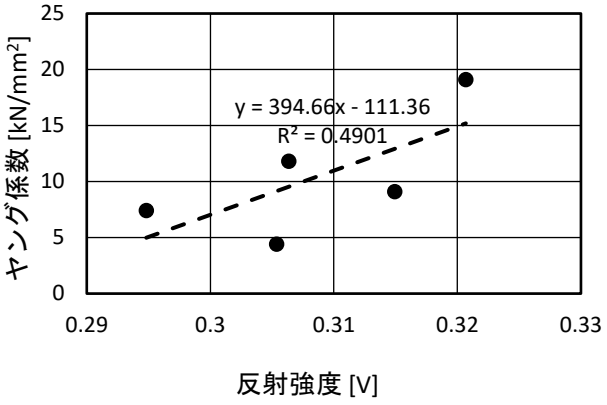


図 3.3.1-14 反射強度とヤング係数の関係
(45.8 GHz)

ここで得られた実験結果の範囲のみでは、キャリブレーションに用いる特定の周波数を予め一意に決定することは容易でないと考えられる。これは、劣化の程度や使用材料、含水率、鉄筋の有無などの測定条件によって変化することが予想されるためである。この一方で、劣化の程度と周波数の少なくとも 2 つを連続的に変更させるパラメータとしてデータベースを構築することにより、特徴的な反射強度の変化を絞り込むことで高精度なキャリブレーションが可能になるものと考えられる。数多くのパラメータを含めて大きなデータベースに拡充した上で、特に近年注目度の大きい機械学習や人工知能の適用などによって特徴量の抽出が可能となれば、これらの複数の劣化要因を考慮に入れた劣化状態の記述を可能とする、より高度なキャリブレーションを踏まえての測定が可能になるものと期待される。

3.3.2　鉄筋腐食と付着不良・剥離等に基づく材料特性の評価（再委託先：日本工業大学）

【令和 3 年度～令和 5 年度】

【令和 4 年度までの概要】

令和 3 年度には、鉄筋腐食と付着不良・剥離等に基づく材料特性の評価として、付着性能評価方法の整理を目的とし、付着不良の検出に向けたテラ（サブテラ）ヘルツ波に及ぼす内部欠陥と含水率の影響についてデータの蓄積を目的とした。そこで、内部欠陥を有する RC の付着性能評価方法の検討と、テラ（サブテラ）ヘルツ波を用いて内部欠陥を模擬し含水状態を調整した試験体の観察を行った。

これらの検討より得られた知見を下記に示す。

- 導入欠陥は塩橋（塩化カリウム水溶液を用いた寒天状のもの）を用いた促進腐食によっても制御可能であることが分かった。既往の研究結果と比較し検討すると、鉄筋の拘束条件を変更することによって原子炉建屋等の大断面部材においても評価できる可能性を示した。
- 水/セメント比が 7.5～12.5 GHz 帯の測定結果に及ぼす明瞭な差は認められず、その影響は小さいものと推測される。
- 含水状態が 7.5～12.5 GHz 帯の測定結果に及ぼす影響は、試験体厚さによって異なることが分かった。また、特異的な周波数帯を選定し検討することによって、含水状態の影響を最小限に測定できる可能性を示した。
- 内部欠陥の検出性能は、試験体厚さ（剥離厚さ）によって異なり、試験体の厚さに応じた特異的な周波数帯があることが分かった。これにより、特定かつ複数の周波数帯を組み合わせた測定を行うことによって、ひび割れ幅や位置を検出できる可能性を示した。

令和 4 年度には、後述の「材料劣化特性に基づく部材の耐震性能評価」において FEM 解析に適用できる力学特性（一体性）の低下を取得することを目的とした。鉄筋腐食と付着不良・剥離等に基づく材料特性の評価を行うため、鉄筋腐食による影響を腐食グレードによる力学特性（一体性）の低下からひび割れ長さやひび割れ幅に置き換えて検討し、鉄筋腐食に由来する引き抜き時の力学特性（一体性）とサブテラヘルツ波イメージング技術による測定結果の整理を行った。

さらに、鉄筋腐食に影響を及ぼすコンクリートの含水率に関して、サブテラヘルツ波イメージング技術による評価方法を提案することを目的とした。

これらの検討より得られた知見を下記に示す。

- 鉄筋腐食による付着強度低下を腐食によって発生するひび割れ幅に置き換え評価することで、サブヘルツ波イメージング技術による評価を可能とする結果を示した。
- 反射率とひび割れ幅に一定の関係性が示されることから、ひび割れ幅から付着強度を推定できる可能性を示した。さらに、ひび割れ幅よりひび割れ長さが付着強度低下に寄与することが認められた。

・ コンクリートの含水率（状態）は、含水率と反射波に直線的な関係が認められ、質量含水率又は容積含水率に置き換えて評価することで、かぶり厚さ程度の平均的な含水状態をサブヘルツ波イメージ測定によって推定できる可能性を示した。

【令和 5 年度実施内容及び成果】

① 実験目的

内部劣化（ひび割れ）や異なる含水分布を有するコンクリート壁模擬試験体と実構造物において、サブテラヘルツ波による反射強度の測定を行い、含水状態や内部劣化を推定できる範囲の整理を目的とする。既存の測定技術（電磁波レーダ・超音波法・赤外線・打音法・接触式含水率計）との比較によって、実構造物を対象としたサブテラヘルツ波光学系測定装置の適用性及び適用範囲を検証する。

② 実験概要

1）測定対象の概要

内部劣化（ひび割れ）と含水率の推定に向けたサブテラヘルツ波の適用性を検討するため、内部劣化の推定を目的とした測定対象と、含水率の推定を目的とした測定対象の 2 つに分類し検討を行う。これらの試験体を対象に測定距離や測定角度を変化させ、サブテラヘルツ波光学系測定装置と既存測定技術による測定を実施する。

(a) 内部劣化の推定を目的とした試験体の水準

内部劣化（ひび割れ）の推定を目的とした測定対象の一覧を表 3.3.2-1 に示す。試験体は、RC の壁を模擬したコンクリート壁模擬試験体①～⑥と損傷したコンクリート梁模擬試験体の計 7 水準とした。

内部劣化を模擬したコンクリート壁模擬試験体の試験体形状を図 3.3.2-1 に示す。コンクリート壁模擬試験体①～⑥は、コンクリート表面と平行に入るひび割れを模擬するため、全長 780×高さ 200×幅 150 ㎜の形状とし、試験体を積み上げることで壁相当とした。

コンクリート壁模擬試験体①は鉄筋なし・模擬ひび割れなし、コンクリート壁模擬試験体②は鉄筋なし・模擬ひび割れありの試験体であり、ともに無筋コンクリートである。コンクリート壁模擬試験体③～⑥は、横筋の本数（2 本、中央 1 本）、かぶり厚さ（10、30 ㎜）が異なる試験体とした。

なお、横筋の本数の違いは、サブテラヘルツ波光学系装置の照射範囲下の鉄筋の有無による影響を確認する目的で配筋した。

模擬ひび割れは、かぶり厚さの深さにひび割れ幅 1、 3 ㎜、ひび割れ長さ 200 ㎜のひび割れを導入した。模擬ひび割れの導入方法は、型枠内の所定の位置に塩化ビニール樹脂製（厚み 1、3 ㎜）の板を設置した。次に型枠にコンクリートを打設し、フレッシュコンクリートの終結直前に板を引き抜くことで、ひび割れを模擬した。

また、曲げ試験によって曲げ破壊し、十分に材齢が経過した損傷したコンクリート梁模擬試験体も用いてサブテラヘルツ波の適用性の確認も行った。損傷したコンクリート梁模擬試験体の試験体を図 3.3.2-2 に示す。試験体形状は、

鉄筋が配筋されたRCであり、全長 2,060×高さ300×幅200 ㎜であった。図に示されるように測定面に対し垂直なひび割れが発生した試験体であった。

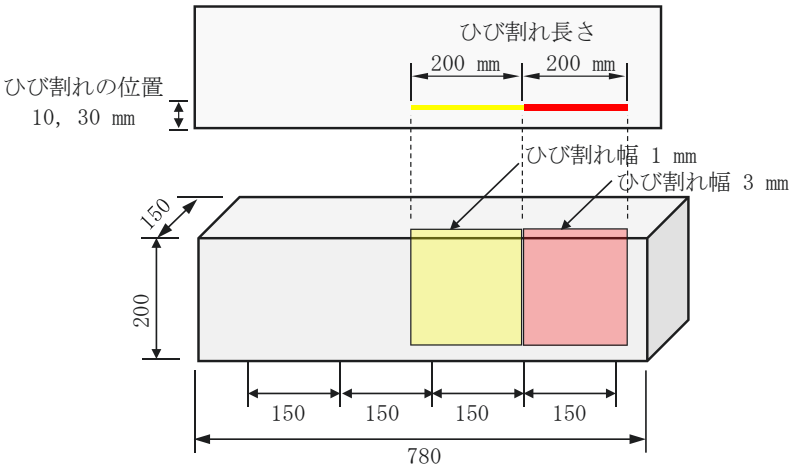
表 3.3.2-1　内部劣化の推定を目的とした測定対象の一覧

<table>
<tr><th rowspan="2">試験体名称</th><th rowspan="2">形状</th><th colspan="2">配筋状態</th><th rowspan="2">かぶり
厚さ</th><th rowspan="2">ひび割れの詳細</th></tr>
<tr><th>縦筋</th><th>横筋</th></tr>
<tr><td>コンクリート壁模擬試験体①
（鉄筋なし）</td><td rowspan="6">全長 780 ㎜
高さ 200 ㎜
幅　150 ㎜</td><td>なし</td><td>なし</td><td>―</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>コンクリート壁模擬試験体②
（鉄筋なし、模擬ひび割れあり）</td><td>なし</td><td>なし</td><td>―</td><td rowspan="5">ひび割れ位置
コンクリート表面から
10、30㎜

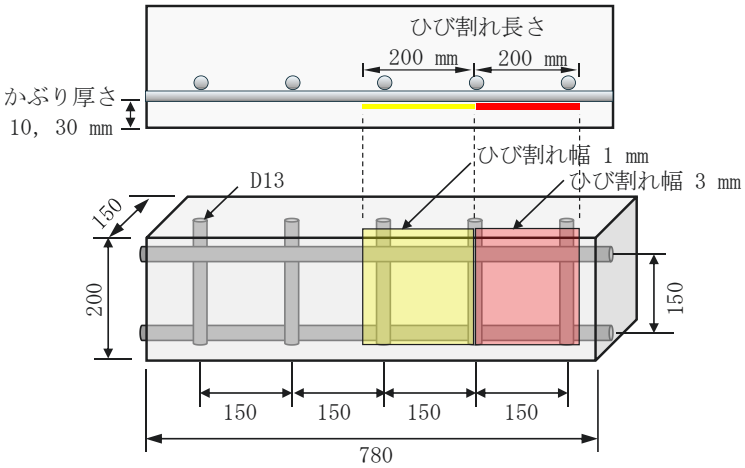
ひび割れ幅
1、3 ㎜

ひび割れ長さ
200 ㎜

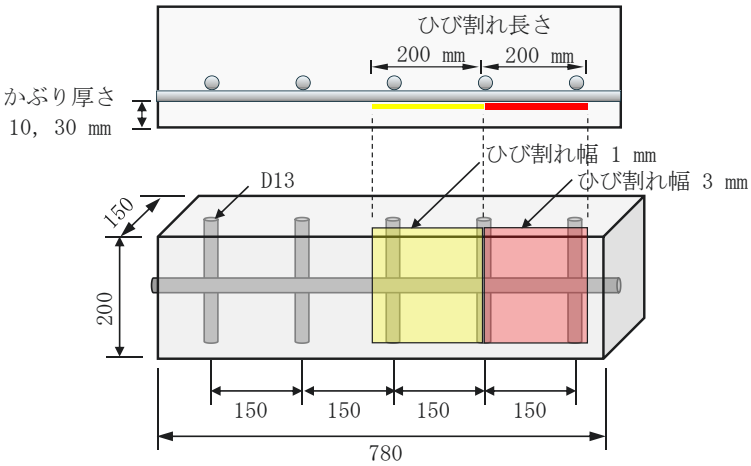
詳細図
図 3.3.2-1</td></tr>
<tr><td>コンクリート壁模擬試験体③
（かぶり 30 ㎜、横筋 2 本）</td><td rowspan="4">D13
@150 ㎜</td><td>2 本
@150 ㎜</td><td>30 ㎜</td></tr>
<tr><td>コンクリート壁模擬試験体④
（かぶり 30 ㎜、横筋中央 1 本）</td><td>中央 1 本</td><td>30 ㎜</td></tr>
<tr><td>コンクリート壁模擬試験体⑤
（かぶり 10 ㎜、横筋 2 本）</td><td>2 本
@150 ㎜</td><td>10 ㎜</td></tr>
<tr><td>コンクリート壁模擬試験体⑥
（かぶり 10 ㎜、横筋中央 1 本）</td><td>中央 1 本</td><td>10 ㎜</td></tr>
<tr><td>損傷したコンクリート梁
模擬試験体</td><td>全長 2,060 ㎜
高さ 300 ㎜
幅　200 ㎜</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>曲げ試験によるひび割れ導入</td></tr>
</table>



【鉄筋なし、模擬ひび割れあり】
(a) コンクリート壁模擬試験体②



【かぶり厚さ 30 mm、横筋 2 本】、【かぶり厚さ 10 mm、横筋 2 本】
(b) コンクリート壁模擬試験体③、コンクリート壁模擬試験体⑤



【かぶり厚さ 30 mm、横筋中央 1 本】、【かぶり厚さ 10 mm、横筋中央 1 本】
(c) コンクリート壁模擬試験体④、コンクリート壁模擬試験体⑥
図 3.3.2-1　内部劣化を模擬したコンクリート壁模擬試験体の試験体形状

図 3.3.2-2　損傷したコンクリート梁模擬試験体

(b) 含水率の推定を目的とした試験体の水準

含水率の推定を目的とした測定対象の一覧を表 3.3.2-2 に示す。試験体は、コンクリート壁模擬試験体⑦～⑨と長崎県長崎市端島（軍艦島）構造物の構造体（壁）を対象とした。

コンクリート壁模擬試験体⑦～⑨の試験体形状を図 3.3.2-3 に示す。試験体形状は、全長 780×高さ 780×幅 150 mm とした。コンクリート壁模擬試験体⑦は鉄筋なしの無筋コンクリート壁とし、コンクリート壁模擬試験体は⑧、⑨は配筋間隔が異なる RC 壁とした。

コンクリート壁模擬試験体⑧の配筋は、かぶり厚さ 30 mm とし、横筋、縦筋ともに D13、鉄筋間隔を 150 mm の均等配筋とした。一方、コンクリート壁模擬試験体⑨の配筋は、サブテラヘルツ波光学系装置の照射範囲下にある鉄筋本数の影響を確認するため、かぶり厚さ 30 mm とし、図 3.3.2-3 に示されるように 45、125、200、250 mm 間隔で配筋された不均等配筋とした。

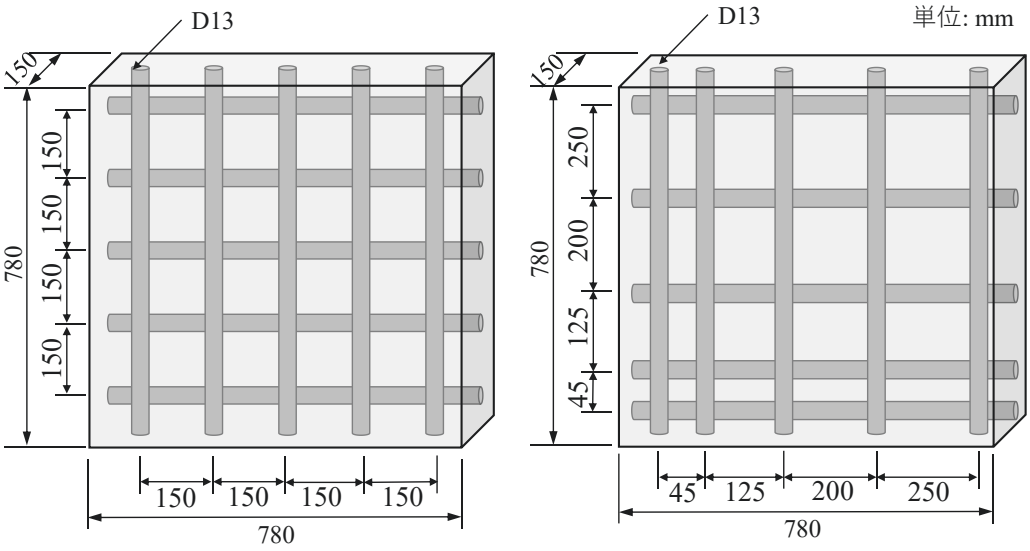
これらの試験体を自然乾燥及び 60 ℃環境の乾燥機を用いて強制乾燥を行い、試験体表層の含水率を調整した。

また、実構造物は、長崎県長崎市端島（軍艦島）にある RC 構造物の構造体（壁）を対象とした（図 3.3.2-4）。

これらの試験体及び端島（軍艦島）構造物を、表 3.3.2-2 に示される含水率においてサブテラヘルツ波光学系装置による測定を行い、適用性の確認を行った。

表 3.3.2-2　含水率の推定を目的とした測定対象の一覧

試験体名称	形　状	配筋状態		かぶり厚さ	測定時の含水率
		縦筋	横筋		
コンクリート壁模擬試験体⑦（無筋コンクリート）	全長 780 mm 高さ 780 mm 幅　150 mm	なし	なし	—	5.7、 4.2、 1.4%
コンクリート壁模擬試験体⑧（均等配筋）		D13 @150 mm	D13 @150 mm	30 mm	5.1%
コンクリート壁模擬試験体⑨（不均等配筋）		40、 125、 200 、250 mm		30 mm	4.8、 3.6、 1.4%
端島（軍艦島）構造物	構造体（壁）	—		—	3.8%



【均等配筋】　　【不均等配筋】

(a) コンクリート壁模擬試験体⑧　　(b) コンクリート壁模擬試験体⑨

図 3.3.2-3　含水率の推定に用いる試験体形状

図 3.3.2-4　端島（軍艦島）構造物の RC における測定位置

2) コンクリートの概要

コンクリート壁模擬試験体①～⑨のコンクリートの計画調合を表 3.3.2-3 に示す。コンクリート壁模擬試験体に用いるコンクリートは、水セメント比 58%の 24-18-20 N 相当のコンクリートとした。打設後、材齢 7 日まで封緘養生を行い脱枠した。脱型後、室内にて自然乾燥を行った。

表 3.3.2-3　コンクリートの計画調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
58	44	176	303	780	1,012

3）測定方法及び測定装置の構成

(a) サブテラヘルツ波光学系測定装置

表 3.3.2-4 に、サブテラヘルツ波光学測定装置の構成を示す。また、図 3.3.2-5 に、サブテラヘルツ波光学測定装置及び測定状況を示す。ここでは、実構造物へ適用するにあたって、測定対象の両側に発信・受信装置を設置する必要のある透過波よりも、片側に設置できる反射波による測定系とした。サブテラヘルツ波の光源は 7.5～12.5 GHz の GUNN ダイオードと可変できる増幅器（アンプ、最大出力 1 W）を使用して測定した。内部劣化の検知に用いる周波数は、3.2.2 項（サブテラヘルツ波イメージング技術の開発）より示された周波数のうち 10.0 GHz を用いて検討した。含水率の検知は、9.4、10.9、11.5、12.3 GHz の周波数を用いて検討した。

表 3.3.2-4　サブテラヘルツ波光学測定装置の構成

機　器	仕　様
発振器	周 波 数：7.5 ～ 15.0 GHz
アンプ	出力範囲：0 ～ 31.5 dBm @0.5 dBm、 最大出力： 1 W、 周 波 数：5 ～ 20 GHz
アンテナ	周 波 数：8.2 ～ 12.4 GHz V S W R ：1:15:1 Typ
テフロンレンズ	直　　径：φ76.2 mm
ハーフミラー	材　　種：シリコンウェア、 タイプ：ノンドープ、 抵 抗 値：1,000 Ωcm 以上
検波器	周 波 数：10 ～ 18.5 GHz 感　　度：450 mV/mW
電磁波吸収体	対応周波数バンド： C、A、B、X、Ku、K

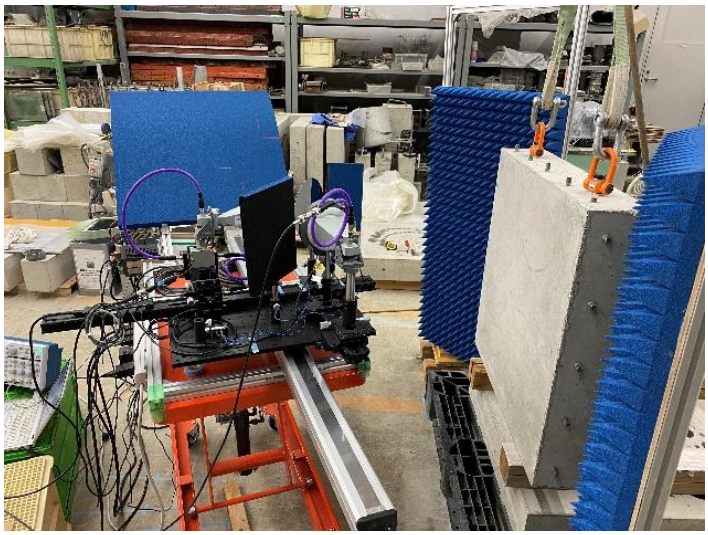


図 3.3.2-5　サブテラヘルツ波光学測定装置及び測定状況

(b) 測定方法及び測定条件の組み合わせ

サブテラヘルツ波光学系測定装置を用いた測定方法は、測定面に対する角度と試験体からサブテラヘルツ波光学系測定装置の距離を水準とした。

測定面に対する測定角度と測定距離の調整方法を図 3.3.2-6 に示す。また、各試験体の測定角度と測定距離における測定条件の組み合わせを表 3.3.2-5 に示す。

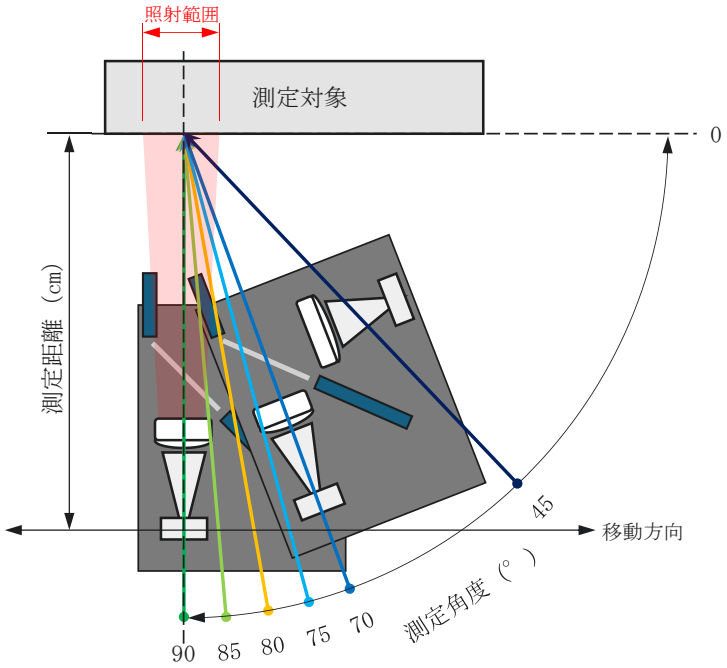


図 3.3.2-6　測定面に対する測定距離と測定角度の調整方法

表 3.3.2-5　測定条件の組み合わせの一覧

対象	試験体名称	測定水準		測定間隔		上段：利用した周波数 下段：測定時の含水率
		角度	距離	水平方向	高さ方向	
内部劣化状態	コンクリート壁模擬試験体①（鉄筋なし）	90° 85° 80° 75° 70°	90 cm 120 cm 180 cm 240 cm	10 cm 7 列	中央 1 列	10.0 GHz 4.0%
	コンクリート壁模擬試験体②（鉄筋なし、模擬ひび割れあり）					10.0 GHz 4.0%
	コンクリート壁模擬試験体③（かぶり 30 mm、横筋 2 本）					10.0 GHz 4.1%
	コンクリート壁模擬試験体④（かぶり 30 mm、横筋中央 1 本）					10.0 GHz 4.0%
	コンクリート壁模擬試験体⑤（かぶり 10 mm、横筋 2 本）					10.0 GHz 4.0%
	コンクリート壁模擬試験体⑥（かぶり 10 mm、横筋中央 1 本）					10.0 GHz 4.1%
	損傷したコンクリート梁模擬試験体	90° 45° *1	90 cm 120 cm 180 cm	0.5 cm 1 列	中央 1 列	10.0、11.5、12.3 GHz 3.6%
含水率状態	コンクリート壁模擬試験体⑦（無筋コンクリート）	90° 85° 80° 75° 70°	90 cm	10 cm 7 列	10 cm 6 列	9.4、10.9、11.5、12.3 GHz 5.7、 4.2、 1.4%
	コンクリート壁模擬試験体⑧（均等配筋）					9.4、10.9、11.5、12.3 GHz 5.1%
	コンクリート壁模擬試験体⑨（不均等配筋）					9.4、10.9、11.5、12.3 GHz 4.8、 3.6、 1.4%
	端島（軍艦島）構造物	90°	90 cm	10 cm 7 列	20 cm 3 列	12.3 GHz 3.8%

*1 測定角度 45° 時の測定距離は 90 cm のみとした。

【測定角度】

コンクート壁模擬試験体①～⑨の測定角度は、試験体を正面から測定した角度を 90°とし、光学系装置の角度を 5°ごとに 70°まで変えて測定した。また、損傷したコンクリート梁模擬試験体の測定角度は 90°と 45°、端島（軍艦島）構造物は 90°のみとした。

【測定距離】

内部劣化の推定を目的とした試験体のうち、コンクリート壁模擬試験体①～⑥の測定距離は 90、120、180、240 cm とした。損傷したコンクリート梁模擬試験体の測定距離は 90、120、180 cm とした。

含水率の推定を目的とした試験体のうち、コンクリート壁模擬試験体⑦～⑨の測定距離は、90 cm とした。端島（軍艦島）構造物の測定距離は 90 cm とした。

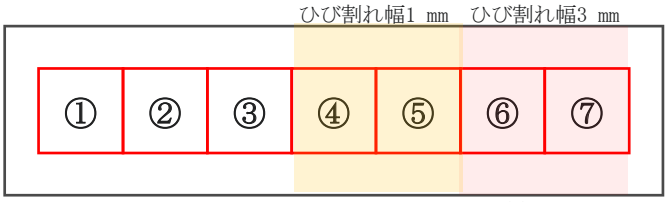
【測定位置】

測定角度と測定距離の組み合わせから決定するサブテラヘルツ波光学系測定装置の測定点を垂直方向、水平方向に移動させ、測定対象範囲の反射強度分布を取得した。

内部劣化のコンクリート壁模擬試験体①～⑥の測定位置を図 3.3.2-7、損傷したコンクリート梁模擬試験体の測定位置を図 3.3.2-8 に示す。

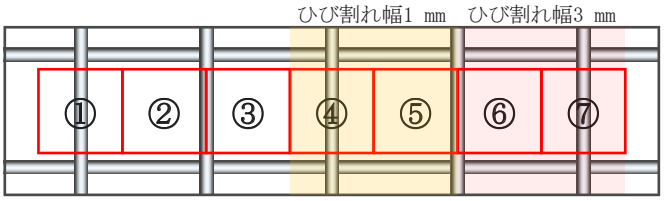
コンクリート壁試験体⑦～⑨の測定位置を図 3.3.2-9、端島（軍艦島）構造物の測定位置を図 3.3.2-10 に示す。

図中の赤枠が測定位置とし、サブテラヘルツ波光学系測定装置の照射範囲の中心が赤枠の中央になるように移動させて測定した。同じ測定系を利用した検討において、照射範囲は測定距離に応じて異なり、測定距離 90 cm 時には約 10 cm とされ、測定距離 180 cm 程度で照射範囲 20 cm になる結果が示されている [3.3.2-1]。このことから、測定対象と試験装置の距離が離れることによって照射範囲は拡大し、測定装置から得られる反射強度は、この照射範囲の広がりとともにコンクリートの平均的な状態を表す値が得られるものと予想される。

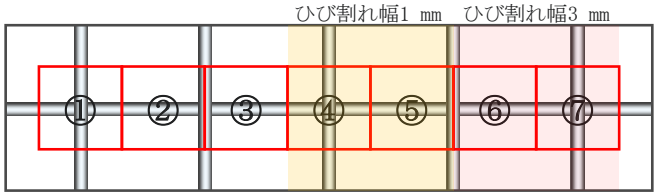


(a) コンクリート壁模擬試験体①※、②

※コンクリート模擬試験体①に模擬ひび割れなしとする。



(b) コンクリート壁模擬試験体③、コンクリート壁模擬試験体⑤



(c) コンクリート壁模擬試験体④、コンクリート壁模擬試験体⑥

図 3.3.2-7　コンクリート壁模擬試験体①～⑥の測定位置

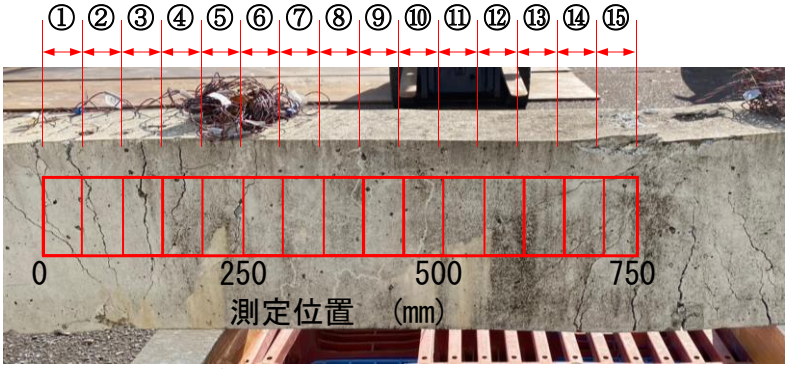
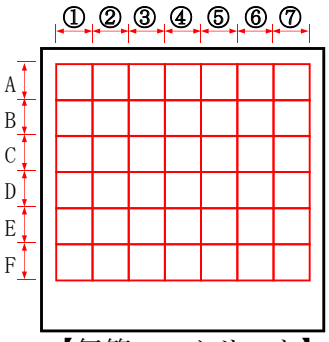
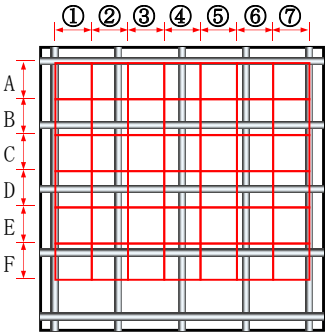


図 3.3.2-8　損傷したコンクリート梁模擬試験体の測定位置



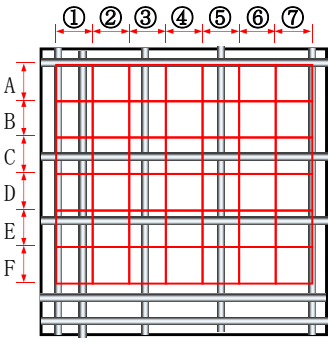
【無筋コンクリート】

(a) コンクリート壁模擬試験体⑦



【均等配筋】

(b) コンクリート壁模擬試験体⑧



【不均等配筋】

(c) コンクリート壁模擬試験体⑨

図 3.3.2-9　コンクリート壁模擬試験体⑦～⑨の測定位置

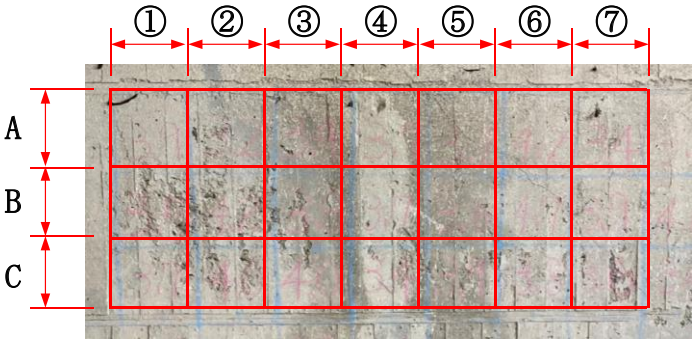


図 3.3.2-10　端島（軍艦島）構造物の測定位置

4）既存測定技術の概要

サブテラヘルツ波光学系測定装置による適用性の確認として、既存の測定技術との比較を行った。本研究で用いた測定法の一覧を表 3.3.2-6 に示す。

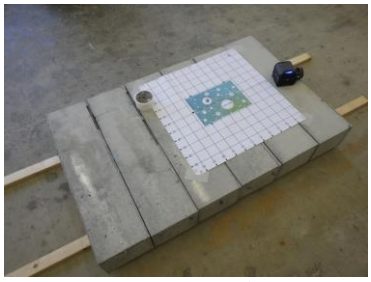
内部劣化の検証に用いる測定技術は、電磁波レーダ、超音波イメージスキャナー、赤外線サーモグラフィー及び打音法とした。

含水率の検証に用いる測定技術は、接触型電気抵抗式含水率計とした。また、含水率計が示す指示値と質量含水率の関係は、試験体の一部からコンクリートコアを採取し 105 ℃乾燥による質量法によって、含水率計の指示値が質量含水率と概ね一致することを確認した。

これらの測定機の測定状況を図 3.3.2-11 に示す。

表 3.3.2-6　適用性検証のための既存測定技術

分　類	仕　様	主な利用用途
電磁波レーダ	原理：ステップ周波数式 （Stepped Frequency Continuous Wave） 最大探査深さ：65 cm 周波数：0.4～6.0 GHz	鉄筋探査 埋設物の探査
超音波 イメージスキャナー	原理：マルチチャンネルパルスエコー（S 波） 帯域幅：20～30 KHz 最大測定深さ：2 m	板厚測定 空隙・空洞・剥離探査 グラウトの充填調査
赤外線 サーモグラフィー	原理：赤外線放射エネルギーの検出 測定温度範囲：-20～250 ℃（分解能 0.1 ℃）	タイルの浮き 剥落範囲の特定
打音法	技術者による判別、卓越周波数成分による評価	タイルの浮き 剥落範囲の特定
接触型電気抵抗式 含水率計	原理：電気抵抗式	建材の含水率測定


電磁波レーダ

超音波イメージスキャナー

赤外線サーモグラフィー

打音法

接触型電気抵抗式含水率計

図 3.3.2-11　既存測定技術の測定状況

③ 実験結果及び考察

1）内部劣化の推定に向けたサブテラヘルツ波光学系測定装置の適用範囲の検討

(a) サブテラヘルツ波光学系測定装置による測定結果

コンクリート壁模擬試験体を対象としたサブテラヘルツ波光学系測定装置の反射強度分布を図 3.3.2-12 に示す。コンクリート壁模擬試験体①は全面が健全であるのに対し、コンクリート壁模擬試験体②～⑥は測定位置①～③が健全部であり、④、⑤が模擬ひび割れ幅 1 ㎜、⑥、⑦が模擬ひび割れ幅 3 ㎜を対象とした値であることを示す。図中に示す値は反射強度である。反射強度に応じカラースケールは、赤＞白＞青の順となる。

コンクリートのみであるコンクリート壁模擬試験体①では、いずれの距離についても測定角度 90°に対して角度を得ることによって検出強度の低下を確認した。入射波に角度が付くことにより試験体表面で反射した際にも角度が発生し、反射波が検出側に伝播しなかったことによるものと推測される。また、電磁波の特性として距離に伴う減衰により、測定距離 90 cm と比較して測定 240 cm では全体的な強度の低下も認められた。

測定位置④～⑦に模擬ひび割れのみを設定したコンクリート壁模擬試験体②では、測定距離 90、120 cm の測定角度 90、85°付近では模擬ひび割れ部分で高い反射強度が認められた。また、ひび割れ幅が大きい測定位置の方で検出強度が高い傾向が認められる。

測定距離 180 cm 以降の 90、85°付近でも顕著な差は認められなかったが、模擬ひび割れの有無による微小の差が確認された。同じ測定系を用いた装置において、模擬ひび割れ幅を正面から測定した有田らによると、ひび割れ幅の大きさによっても検出強度が異なることが報告されている[3.3.2-1]。したがって、測定距離 90、120 cm の測定角度 90、85°付近では内部ひび割れの有無又は検出強度によりひび割れ幅の判別ができる可能性が示された。また、測定距離 180 cm 以降の 85°付近でも、検出強度の大小関係により、内部ひび割れの有無は判別できると推測される。

模擬ひび割れと縦筋、横筋 1 本を含むコンクリート壁模擬試験体④では、縦筋が照射範囲の中心にある測定位置①、④、⑦、またその前後の測定位置で、いずれの距離においても測定角度 85°付近で反射強度の差が見られた。コンクリート壁模擬試験体①のように測定角度が付くことによってコンクリート表面からの反射波が検出側に伝播しないため、検出強度が小さくなったと考えられる。一方で、照射範囲に鉄筋が含まれる場合は、鉄筋から得られる反射波によって高い強度が得られたと推測される。

測定距離 180 cm 以降の 80°付近の測定位置①～⑦にかけて一定の反射強度が認められた。測定距離の変化に伴う照射範囲の拡大により、鉄筋の有無に関わらず平均的な反射強度が検出されたと推測される。

模擬ひび割れと縦筋、横筋 2 本を含むコンクリート壁模擬試験体③でも、概ねコンクリート壁模擬試験体④と同様の傾向を持つ結果が得られた。横筋の本数の違いに対して、顕著な差が認められないことから、検出強度に与える横筋の影響は小さいものと推測される。

また、コンクリート壁模擬試験体③と⑤、④と⑥として、横筋の本数、模擬ひび割れの導入位置から比較すると、両者ともに概ね類似した傾向であること

から、かぶり厚さ 30 mm、内部ひび割れ位置 30 mm まで内部劣化を特定できるものと推測される。

【測定距離：90 cm】

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	454	538	614	743	565	642	860
85 °	420	757	559	827	489	1309	900
80 °	436	480	460	420	701	590	143
75 °	459	440	318	71	140	119	360
70 °	63	405	174	300	280	308	200

【測定距離：120 cm】

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	60	200	415	601	519	620	580
85 °	283	460	680	180	712	140	600
80 °	400	120	80	160	600	716	260
75 °	356	120	120	337	419	104	220
70 °	300	339	220	60	140	180	224

【測定距離：180 cm】

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	420	360	367	380	360	428	419
85 °	561	546	619	700	498	252	280
80 °	580	520	521	266	131	253	280
75 °	362	79	340	148	125	271	189
70 °	261	282	159	339	133	260	284

【測定距離：240 cm】

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	140	240	280	180	240	240	140
85 °	180	241	240	280	285	200	153
80 °	96	220	316	207	279	79	222
75 °	238	111	111	254	140	159	202
70 °	134	121	144	199	160	134	146

コンクリート壁模擬試験体①（鉄筋なし、模擬ひび割れ無し）

ひび割れ幅 1 mm 3 mm

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	100	320	388	660	640	805	983
85 °	720	555	600	696	621	888	940
80 °	200	140	240	240	409	420	46
75 °	460	485	330	181	12	148	340
70 °	173	410	67	400	180	220	206

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	32	80	243	460	493	498	597
85 °	500	160	560	126	760	84	481
80 °	120	36	47	187	513	500	237
75 °	323	179	61	299	319	121	225
70 °	319	241	140	141	165	220	320

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	319	241	280	349	324	340	221
85 °	401	460	520	680	439	362	257
80 °	481	400	251	65	120	224	283
75 °	351	140	349	201	240	344	221
70 °	280	260	240	240	220	260	340

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	100	180	240	180	200	301	185
85 °	60	368	104	400	100	227	219
80 °	142	300	368	269	230	158	190
75 °	238	111	163	190	207	142	169
70 °	111	140	140	140	140	140	62

コンクリート壁模擬試験体②（鉄筋なし、模擬ひび割れ有り）

ひび割れ幅 1 mm 3 mm

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	20	47	220	440	560	640	800
85 °	920	180	933	360	939	460	980
80 °	420	400	400	331	341	397	104
75 °	240	341	527	480	200	69	300
70 °	280	283	124	441	120	218	234

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	133	20	180	378	466	518	561
85 °	600	100	640	55	638	23	440
80 °	41	43	201	297	561	440	269
75 °	364	333	100	140	279	100	200
70 °	223	104	100	240	138	280	320

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	96	120	100	135	74	220	98
85 °	126	193	300	460	400	380	300
80 °	200	101	40	77	181	181	340
75 °	98	420	100	366	346	303	297
70 °	300	280	307	200	280	280	241

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	204	287	141	221	306	139	209
85 °	20	360	102	362	187	160	170
80 °	309	311	190	64	222	95	222
75 °	253	133	230	140	218	226	200
70 °	118	160	159	180	100	213	107

コンクリート壁模擬試験体③（かぶり厚さ30 mm, 横筋 2 本）

ひび割れ幅 1 mm 3 mm

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	100	140	280	431	464	463	472
85 °	106	980	280	1186	517	800	954
80 °	980	615	160	786	1161	169	120
75 °	81	72	72	17	28	255	265
70 °	247	437	120	277	320	212	385

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	153	165	206	296	348	400	400
85 °	549	860	110	760	820	21	290
80 °	100	101	149	243	204	3	180
75 °	231	106	519	198	120	321	334
70 °	159	140	167	220	211	255	259

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	236	140	105	100	63	188	100
85 °	600	580	220	59	253	500	146
80 °	680	659	700	681	584	261	200
75 °	440	160	279	260	121	200	246
70 °	265	360	263	235	200	201	261

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	140	220	116	60	140	220	240
85 °	262	29	389	33	284	143	140
80 °	3	119	200	224	238	100	220
75 °	172	140	111	301	120	190	132
70 °	102	140	180	115	140	160	200

コンクリート壁模擬試験体④（かぶり厚さ30 mm, 横筋 中央1 本）

ひび割れ幅 1 mm 3 mm

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	480	500	590	923	1181	781	682
85 °	380	820	365	1200	480	1911	860
80 °	820	1108	780	506	2120	920	380
75 °	310	381	299	341	88	298	240
70 °	63	504	263	33	496	219	304

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	2	1	80	160	274	185	1
85 °	61	781	661	381	1060	1224	78
80 °	258	439	495	734	1207	640	158
75 °	546	120	140	820	305	441	380
70 °	401	452	640	337	301	454	365

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	460	271	280	390	390	498	560
85 °	140	523	701	660	420	154	299
80 °	520	580	624	442	507	301	258
75 °	459	229	420	200	269	280	280
70 °	136	100	289	258	300	382	241

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	209	279	113	140	100	361	253
85 °	328	20	360	340	40	261	160
80 °	80	320	241	301	180	157	180
75 °	200	120	200	178	146	160	176
70 °	140	140	140	187	138	160	61

コンクリート壁模擬試験体⑤（かぶり厚さ10 mm, 横筋 2 本）

ひび割れ幅 1 mm 3 mm

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	60	80	140	188	340	660	402
85 °	200	980	660	1180	893	1220	1164
80 °	1084	604	400	1160	1601	601	149
75 °	57	33	17	32	16	256	216
70 °	374	440	106	416	494	232	344

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	140	40	11	2	0	123	11
85 °	120	600	920	220	1021	1120	69
80 °	926	969	1081	1239	1420	900	225
75 °	339	500	80	421	400	392	281
70 °	360	300	380	389	236	398	349

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	363	441	420	395	300	457	500
85 °	361	33	224	707	660	260	360
80 °	43	62	63	22	1	280	197
75 °	41	577	81	423	424	288	240
70 °	381	301	105	394	240	314	300

測定角度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
90 °	104	260	247	124	64	200	300
85 °	305	203	167	481	7	375	101
80 °	340	400	344	135	332	86	283
75 °	140	182	265	141	251	160	202
70 °	96	160	139	141	205	200	119

コンクリート壁模擬試験体⑥（かぶり厚さ10 mm, 横筋中央 1 本）

図 3.3.2-12　内部劣化の反射強度分布（コンクリート壁模擬試験体①～⑥）

(b) 既存測定技術による測定結果

既存の測定技術を用いて得られた結果について、電磁波レーダを図 3.3.2-13、超音波イメージスキャナーを図 3.3.2-14、赤外線サーモグラフィーを図 3.3.2-15 に示す。

健全なコンクリート壁模擬試験体①における電磁波レーダと超音波イメージスキャナーの結果は、表面から 150 ㎜の深さに試験体厚さに由来する強い反射が得られている。コンクリート内部は深さ 0～150 ㎜の範囲に反射はなく一様な反射画像を示している。また、赤外線サーモグラフィーは、概ね左右対称の温度分布を示している。この結果とコンクリート壁模擬試験体②～⑥を測定機種別ごとに比較した知見を下記に示す。

電磁波レーダによる内部劣化の検知は、反射法による比較となる。コンクリート壁模擬試験体③と④、⑤と⑥を比較すると横筋の有無による差はないと推測される結果が得られた。コンクリート壁模擬試験体①に比べコンクリート壁模擬試験体②～⑥は、模擬ひび割れ 3 ㎜の部分（図中、赤矢印）にひび割れに相当する反射が得られていることが分かる。この結果に対し模擬ひび割れ 1 ㎜を導入した部分において、ひび割れ特有の反射波が得られていないことから、ひび割れ幅 1 ㎜程度の検出は困難であるものと推測される。

超音波イメージスキャナー内部劣化の検知は、反射波による比較となる。模擬ひび割れ幅による反射波の違いはなく、模擬ひび割れを導入した部分に一様な反射が得られている。このことから、ひび割れ幅の特定には至らないと推測されるが、ひび割れ位置の特定は測定機の検出可能限界の深さまで可能であると考えられる。

赤外線サーモグラフィーによる内部劣化の検知は、温度差による比較となる。コンクリート壁模擬試験体②～⑥において、ひび割れ幅が増すことでコンクリート表面の温度が低くなる傾向が示されている。特に、コンクリート壁模擬試験体⑤、⑥はひび割れ幅に応じて明確な差が得られていることが見て取れる。しかし、模擬ひび割れ幅の導入深さが深くなることによって、ひび割れ幅による差が小さくなる傾向が示している。このため、温度差を利用した赤外線サーモグラフィーは、内部に発生したひび割れ範囲の検出に適していると判断できる。

また、打音法による結果を表 3.3.2-7 に示す。打撃棒を利用した打音法は、一般的に技術者の判断に委ねられる。このことから、本実験では定量的に比較するため、コンクリートを打撃し、得られる音波から周波数を算出し比較した。

コンクリート壁模擬試験体①～⑥の健全部の周波数は、ばらつきがあるものの約 800 Hz 程度の値を示す。コンクリート壁模試験体ごとに違いが認められるものの、模擬ひび割れ幅による周波数の差は明確に認められない結果となった。一方、模擬ひび割れの導入深さからコンクリート壁試験体の③、④と⑤、⑥の比較をすると、導入深さが浅い方が、得られる周波数が低くなる一般的な傾向を示した。

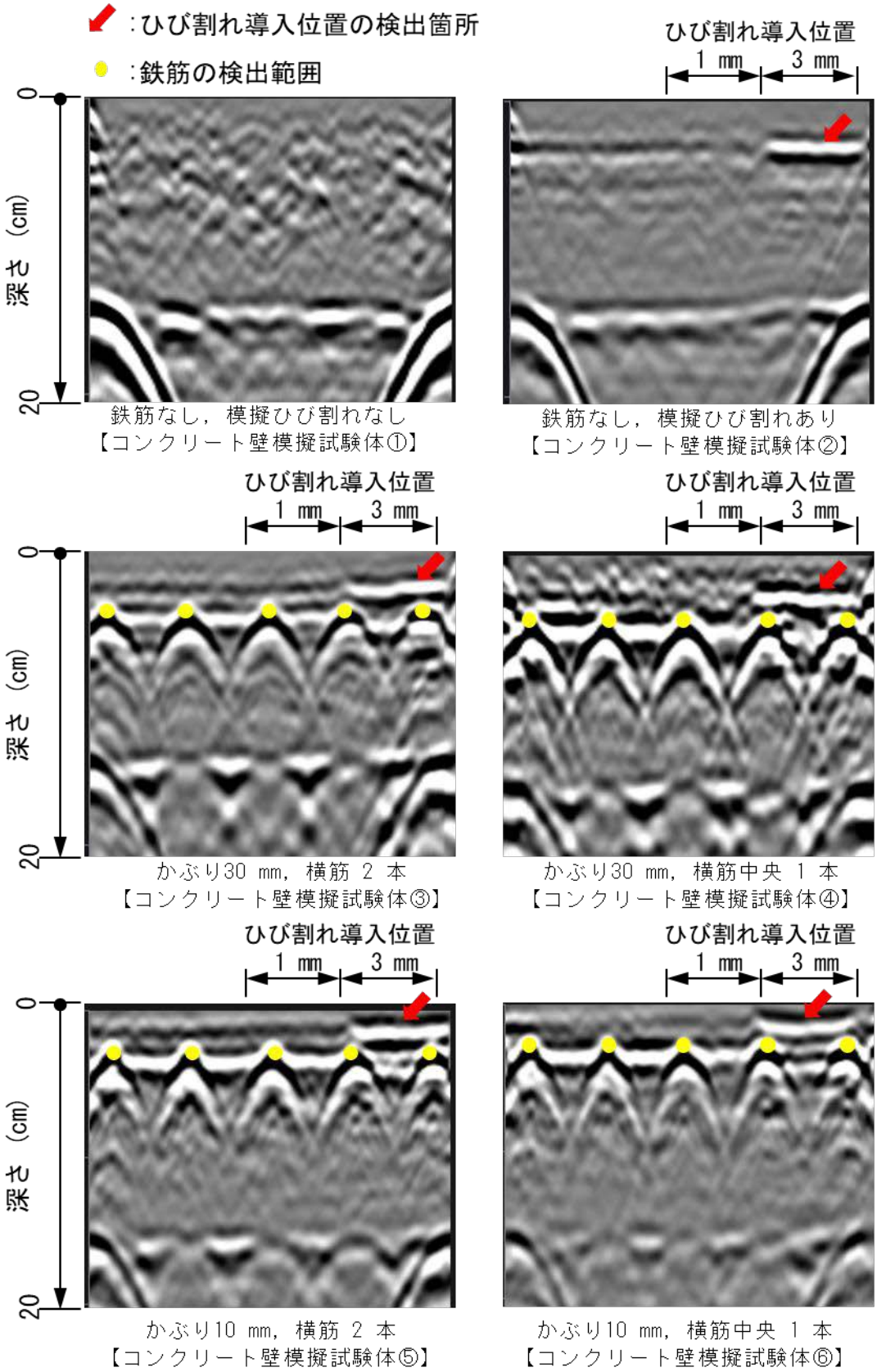


図 3.3.2-13　電磁波レーダによる検知

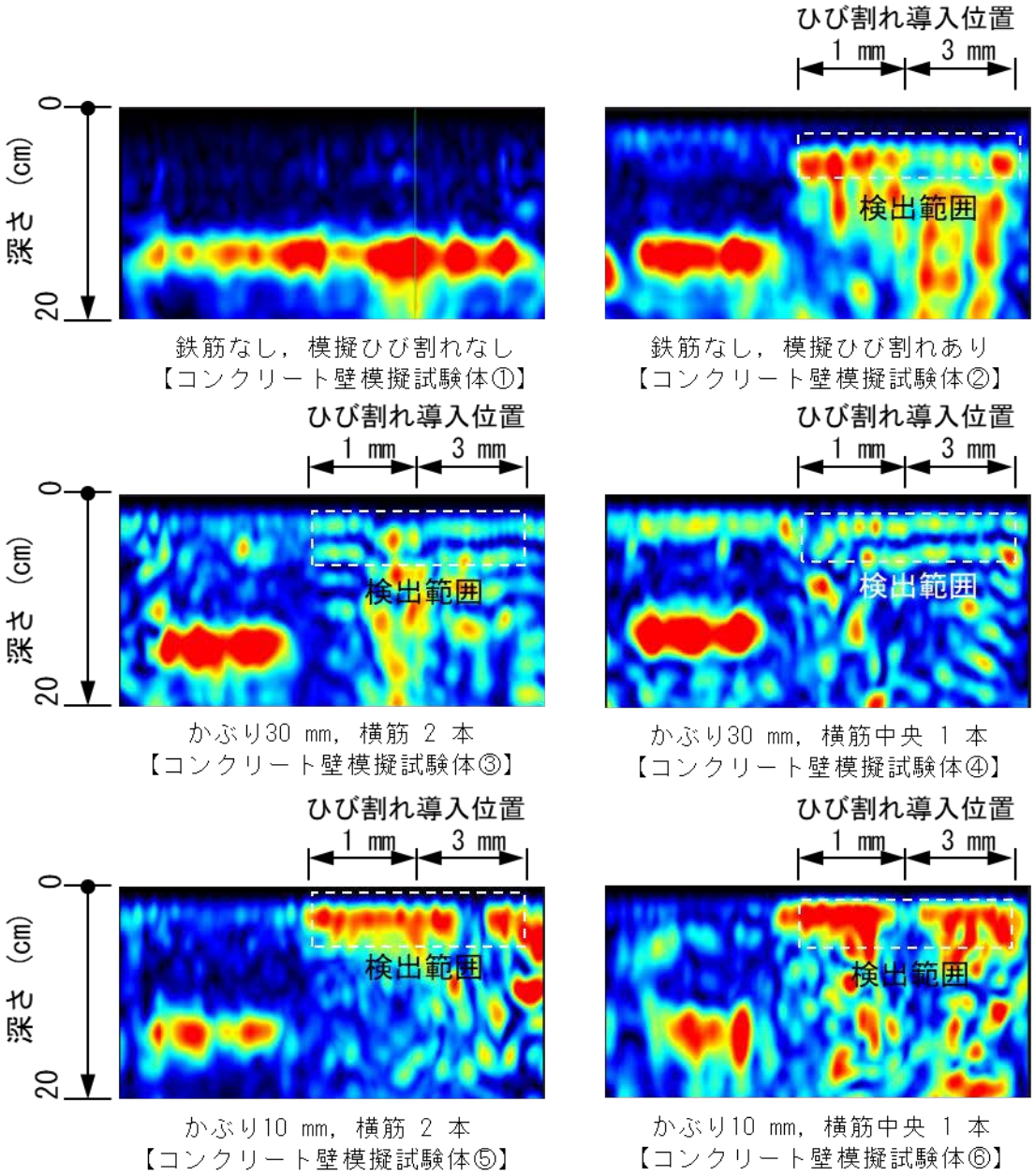
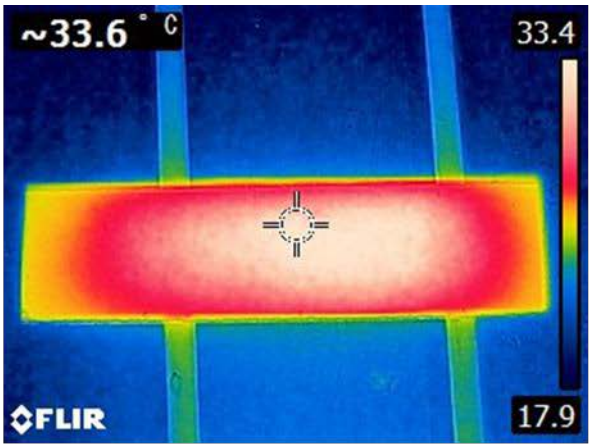
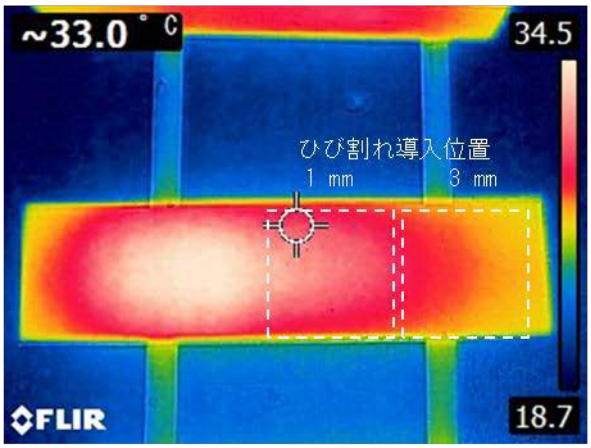


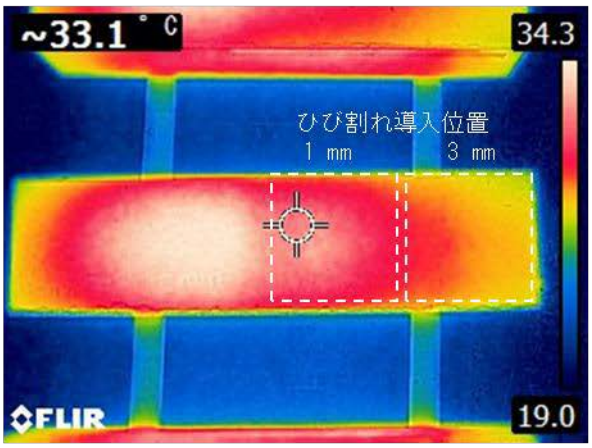
図 3.3.2-14　超音波イメージスキャナーによる検知



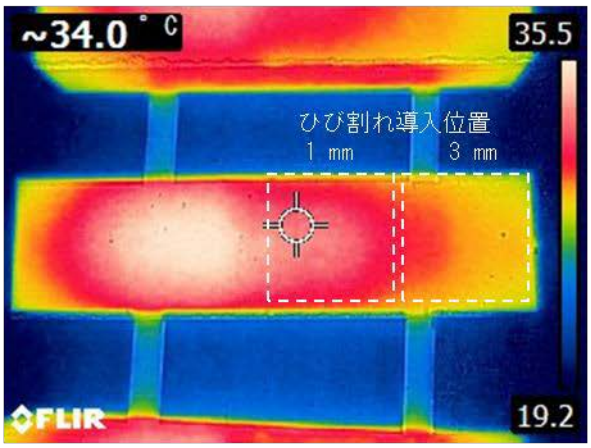
鉄筋なし，模擬ひび割れなし
【コンクリート壁模擬試験体①】



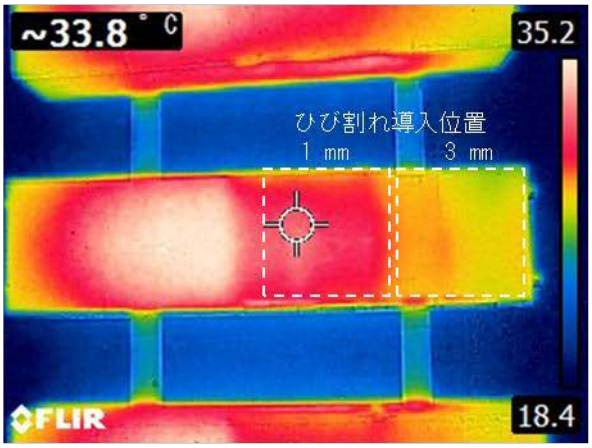
鉄筋なし，模擬ひび割れあり
【コンクリート壁模擬試験体②】



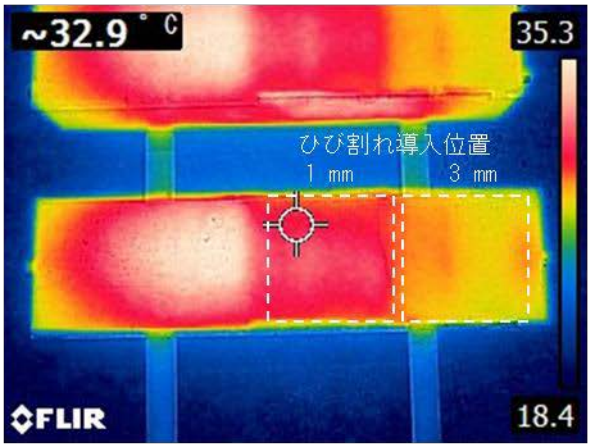
かぶり30 mm，横筋 2 本
【コンクリート壁模擬試験体③】



かぶり30 mm，横筋中央 1 本
【コンクリート壁模擬試験体④】



かぶり10 mm，横筋 2 本
【コンクリート壁模擬試験体⑤】



かぶり10 mm，横筋中央 1 本
【コンクリート壁模擬試験体⑥】

図 3.3.2-15　赤外線サーモグラフィーによる検知

表 3.3.2-7　打音法による卓越周波数

試験体名称	健全部 (Hz)	ひび割れ部 (Hz)	
		1 mm	3 mm
コンクリート壁模擬試験体①（鉄筋なし）	804	—	—
コンクリート壁模擬試験体②（鉄筋なし、模擬ひび割れあり）	495	668	624
コンクリート壁模擬試験体③（かぶり 30 mm、横筋 2 本）	1082	646	695
コンクリート壁模擬試験体④（かぶり 30 mm、横筋中央 1 本）	820	571	555
コンクリート壁模擬試験体⑤（かぶり 10 mm、横筋 2 本）	770	506	614
コンクリート壁模擬試験体⑥（かぶり 10 mm、横筋中央 1 本）	790	334	398

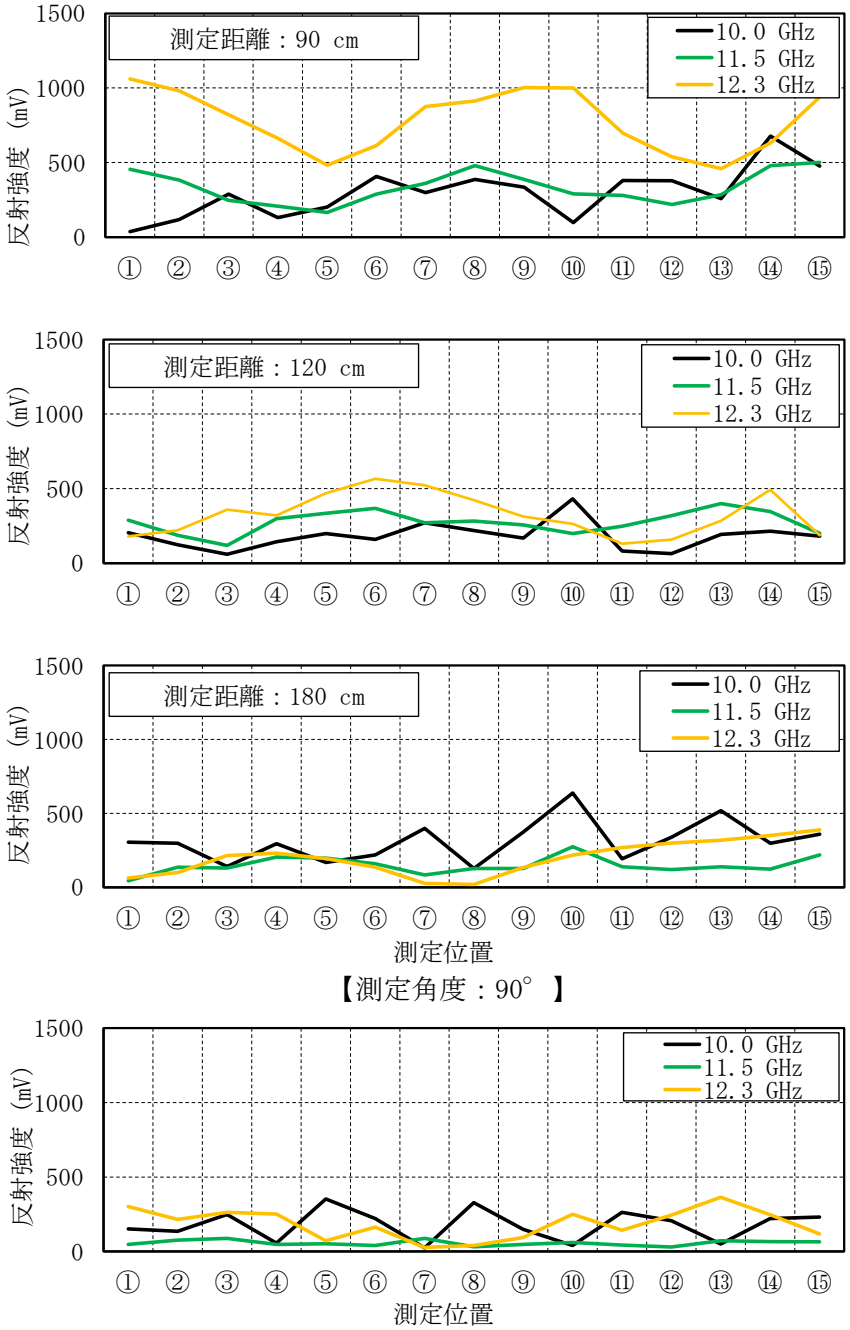
(c) 損傷したコンクリート梁模擬試験体の測定結果

損傷したコンクリート梁模擬試験体の反射強度分布を図 3.3.2-16 に示す。測定位置①～⑥、⑪～⑮に主な曲げひび割れが発生した位置である。また、損傷したコンクリート梁模擬試験体のひび割れ発生状況は、曲げ試験を実施されているため、コンクリート表面に対し垂直に発生している。一方、コンクリート壁模擬試験体③～⑥は、コンクリート表面と平行に模擬ひび割れを導入しており、導入方向が異なる。

これを踏まえ検討すると、測定角度 90°、測定距離 90～180 cm では、どの周波数においても曲げひび割れが発生した測定位置①～⑥、⑪～⑮と損傷の少ない測定位置⑦～⑩に傾向はなく、損傷を判別できる結果に至らなかった。これは、前述に記述したように、ひび割れの発生方向の違いによるものと推測される。

測定距離 90 cm の測定角度 45° と 90° の反射強度を比較した結果、測定角度が付くことによって、どの周波数においても反射強度が低下する傾向を示す。11.5 GHz と 12.3 GHz の測定位置における反射強度は、ひび割れが発生した測定位置①～⑥、⑪～⑮に比べ損傷の少ない測定位置⑦～⑩の方が小さい傾向を示す。この要因は、角度が付くことによって、コンクリート表面に垂直に発生したひび割れが、電磁波の伝播経路に対し垂直になるため、得られる反射強度が強くなったと推測される。

一方、10 GHz は 11.5、12.3 GHz と異なり、損傷に応じた反射強度は得られず、一定距離間隔で強い反射強度が得られる結果となった。要因としてせん断補強筋による影響も示唆される結果を示した。



【測定角度：90° 】

【測定角度：45° 】

図 3.3.2-16　損傷したコンクリート梁模擬試験体の反射強度分布

2) 含水率の推定に向けたサブテラヘルツ波光学系測定装置の適用範囲の検討

(a) サブテラヘルツ波光学系測定装置による測定結果

含水率の検知に向けたサブテラヘルツ波光学系測定装置による強度分布のうち、コンクリート壁模擬試験体⑦(無筋コンクリート)を図 3.3.2-17～図 3.3.2-20、コンクリート壁模擬試験体⑧（均等配筋）を図 3.3.2-21～図 3.3.2-24 及びコンクリート壁模擬試験体⑨（不均等配筋）を図 3.3.2-25 に示す。カラースケールは各試験体の含水率ごとに色付けし、赤＞白＞青色の順に検出強度が低くなることを示す。また、既存測定技術の接触型電気抵抗式含水率計によって測定した含水率分布を図 3.3.2-26 に示す。

縦筋の配筋状態の影響をコンクリート壁模擬試験体⑦（無筋コンクート）に対し、コンクリート壁模擬試験体⑧（均等配筋）、コンクリート壁模擬試験体⑨（不均等配筋）と比較する。配筋された試験体の測定角度 85、80、75°では、周波数が高いほど強弱が明確な縦縞模様の反射強度が得られた。高い反射強度が得られた測定点は、照射範囲に鉄筋（縦筋）が配筋されていることから、鉄筋（縦筋）の影響によって強い反射強度が得られたと推測される。特に 12.3 GHz の縦縞模様は明瞭である。これは、測定角度によって、照射範囲に鉄筋を含まないコンクリート単体の時、表層で反射されたサブテラヘルツ波は、入射波と反射波の伝播経路が異なるため検出強度が小さくなったと推測する。一方で、コンクリートへ浸透したサブテラヘルツ波は、鉄筋で反射し入射波と同じ経路で伝播したため、強い反射強度を得られた。このため、鉄筋の有無によって反射強度の分布が得られたと推測する。

(b) 既存測定技術による測定結果

接触型電気抵抗式含水率計によって測定された含水率分布と反射強度分布の対応関係を比較する。コンクリート壁模擬試験体⑦（無筋コンクリート）の反射強度分布は、測定角度 90～85°の時、周波数によらず含水率分布に概ね一致することが認められた。

また、コンクリート壁模擬試験体⑧、⑨の反射強度分布は、配筋状態によらずどの周波数においても測定角度 90°の時、含水率分布に類似した反射強度が得られる結果が認められた。しかし、測定角度 85～70°と測定角度が減少するにつれて、鉄筋による影響が大きくなり、含水率の推定に至る結果は得られなかった。

このことにより、サブテラヘルツ波によって含水率を推定する際は、鉄筋の有無を考慮し、測定角度 90°に対し±5°未満に抑えて測定する必要があることが分かった。

測定角度90°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	196	205	320	339	458	398	574
	B	101	88	200	294	382	339	399
	C	135	159	228	257	419	378	418
	D	179	180	286	278	399	269	333
	E	219	256	339	348	299	158	242
	F	378	378	340	318	161	98	168
4.2%	A	296	224	272	240	241	307	440
	B	560	220	95	180	233	350	458
	C	213	398	177	158	167	304	340
	D	400	321	211	100	204	300	340
	E	340	260	74	174	292	262	320
	F	200	160	216	301	341	201	341
1.4%	A	659	261	567	480	503	383	505
	B	260	460	320	290	401	421	404
	C	480	517	377	400	279	339	435
	D	380	243	480	220	411	360	340
	E	408	421	259	406	164	417	381
	F	360	393	299	520	540	265	400

測定角度85°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	926	1000	852	793	960	1018	380
	B	598	640	616	580	819	835	272
	C	677	679	620	620	877	839	281
	D	758	700	578	598	879	822	241
	E	766	697	559	578	897	722	181
	F	688	598	698	782	785	1	20
4.2%	A	601	941	900	754	961	720	219
	B	634	498	673	596	794	680	232
	C	740	621	594	598	800	579	216
	D	598	637	380	633	697	540	220
	E	720	360	535	697	640	590	300
	F	580	511	696	688	538	760	280
1.4%	A	560	840	939	900	808	938	241
	B	500	400	637	701	800	859	203
	C	740	646	760	757	890	780	221
	D	557	683	500	375	430	636	223
	E	679	537	560	463	864	700	259
	F	619	741	617	640	363	698	283

測定角度80°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	758	542	520	762	798	400	60
	B	631	461	401	577	838	385	40
	C	509	293	360	643	758	413	70
	D	580	398	360	600	756	458	100
	E	573	483	360	520	719	480	140
	F	439	558	484	399	494	419	142
4.2%	A	440	531	517	460	475	300	39
	B	397	640	420	266	460	250	59
	C	583	321	360	300	327	246	40
	D	501	381	580	337	318	132	20
	E	360	371	480	377	358	220	83
	F	261	340	481	542	560	354	171
1.4%	A	300	380	369	323	479	237	80
	B	80	380	237	300	378	283	120
	C	255	200	162	346	341	280	100
	D	240	187	332	20	528	223	72
	E	154	218	170	300	270	313	75
	F	220	227	320	120	57	180	152

測定角度75°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	127	22	41	201	120	7	66
	B	120	29	40	170	158	61	24
	C	120	22	20	162	158	61	36
	D	159	21	15	148	169	25	48
	E	66	26	85	111	16	6	40
	F	123	157	130	24	24	29	21
4.2%	A	81	103	105	63	21	93	139
	B	220	120	75	2	40	79	71
	C	17	104	39	24	50	24	56
	D	123	232	94	40	42	7	39
	E	98	120	32	16	88	6	23
	F	106	56	37	40	127	24	15
1.4%	A	80	55	100	114	60	45	40
	B	61	118	121	103	81	39	39
	C	80	40	160	40	60	49	17
	D	20	59	1	100	30	39	40
	E	42	23	63	29	15	36	49
	F	46	55	2	53	9	36	27

測定角度70°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	6	16	54	7	68	48	53
	B	14	17	53	17	64	42	63
	C	11	26	75	20	43	63	44
	D	48	111	75	59	99	57	77
	E	68	96	158	109	41	47	44
	F	120	126	167	144	38	42	11
4.2%	A	40	232	72	72	141	16	10
	B	32	128	134	24	78	73	49
	C	24	88	154	16	45	45	55
	D	40	119	128	39	29	55	64
	E	16	110	88	26	8	82	64
	F	32	48	73	92	21	110	120
1.4%	A	101	48	32	93	17	9	30
	B	82	74	61	93	34	7	24
	C	118	62	55	105	37	7	31
	D	75	24	26	129	46	1	31
	E	70	56	106	76	88	6	18
	F	34	77	121	104	209	49	4

【反射強度分布（mV）】

図 3.3.2-17　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑦、測定周波数：9.4 GHz）

測定角度90°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	300	434	578	638	527	459	399
	B	213	379	538	539	403	339	248
	C	265	423	499	559	434	319	226
	D	380	496	556	578	403	259	198
	E	441	501	500	459	264	116	219
	F	575	407	251	145	120	200	537
4.2%	A	607	481	256	319	599	715	481
	B	720	360	127	240	520	531	318
	C	500	460	140	300	518	506	239
	D	593	422	100	278	520	518	161
	E	514	274	100	465	530	339	120
	F	366	162	481	563	298	60	480
1.4%	A	970	760	900	890	727	578	380
	B	600	890	860	803	700	495	420
	C	822	920	754	781	736	617	511
	D	566	674	741	800	554	741	679
	E	582	687	682	859	743	800	780
	F	301	342	300	420	737	320	743

測定角度85°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	900	738	646	778	979	1337	695
	B	719	537	500	679	922	1196	575
	C	739	504	489	599	878	1245	550
	D	560	427	517	737	996	1280	479
	E	457	447	698	937	1078	1242	321
	F	601	920	1097	1074	877	698	101
4.2%	A	580	439	663	1089	1081	806	56
	B	437	121	596	943	860	560	104
	C	559	333	703	918	780	501	156
	D	342	400	542	880	700	400	240
	E	320	420	864	879	545	375	440
	F	535	913	796	445	400	859	539
1.4%	A	914	1083	575	580	1157	1238	180
	B	964	720	448	500	960	1061	120
	C	939	920	560	457	973	1040	64
	D	880	682	235	420	836	902	44
	E	900	580	370	709	1013	779	98
	F	587	380	840	1060	311	400	448

測定角度80°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	220	756	343	661	460	479	360
	B	178	640	269	601	459	341	239
	C	150	621	300	528	549	260	189
	D	195	558	377	439	659	141	144
	E	407	418	540	299	799	78	40
	F	680	201	658	298	595	461	101
4.2%	A	140	279	700	380	313	541	327
	B	248	357	582	401	221	579	291
	C	204	238	586	390	221	489	202
	D	320	70	696	481	187	461	180
	E	480	99	439	620	224	267	97
	F	592	343	180	616	560	60	20
1.4%	A	347	120	476	131	479	80	120
	B	239	100	446	97	493	37	60
	C	420	120	380	99	501	1	17
	D	419	21	500	120	430	18	2
	E	422	20	396	79	460	77	52
	F	244	295	143	299	160	320	280

測定角度75°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	140	171	19	300	54	120	141
	B	131	148	34	247	41	81	90
	C	142	161	32	266	39	92	99
	D	156	124	44	259	11	63	49
	E	203	89	97	205	28	82	32
	F	178	8	207	35	161	185	147
4.2%	A	40	21	40	68	120	48	74
	B	40	22	40	60	81	34	12
	C	24	43	32	50	73	38	24
	D	80	16	27	30	35	64	32
	E	88	58	26	24	22	95	41
	F	208	239	225	224	184	204	255
1.4%	A	200	44	110	284	121	180	320
	B	120	33	151	260	195	201	259
	C	116	41	100	261	180	197	261
	D	195	40	123	159	198	207	218
	E	222	60	67	176	227	182	164
	F	170	216	95	107	163	42	102

測定角度70°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	116	210	96	68	57	222	206
	B	102	248	188	68	48	225	151
	C	86	216	195	62	48	232	124
	D	53	188	190	59	56	198	108
	E	31	120	216	84	84	157	101
	F	23	151	21	119	42	164	187
4.2%	A	79	34	169	48	61	104	72
	B	51	81	184	40	73	114	130
	C	33	114	136	40	104	136	131
	D	57	70	192	16	152	179	198
	E	40	168	120	32	165	176	174
	F	72	144	32	149	80	128	201
1.4%	A	195	81	112	221	40	108	77
	B	196	80	134	260	57	119	72
	C	197	48	105	249	68	87	32
	D	146	49	173	121	52	104	59
	E	163	32	201	244	40	94	72
	F	61	124	132	64	24	131	218

【反射強度分布（mV）】

図 3.3.2-18　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑦、測定周波数：10.9 GHz）

測定角度90°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	518	503	552	546	470	398	572
	B	399	400	441	420	359	341	478
	C	465	418	438	438	319	260	473
	D	518	439	417	465	318	277	490
	E	511	439	361	423	338	316	483
	F	430	397	359	346	398	454	418
4.2%	A	528	376	318	398	480	360	476
	B	479	220	196	298	404	320	402
	C	427	351	361	341	398	223	415
	D	362	380	231	380	396	181	400
	E	382	220	279	487	344	154	380
	F	281	363	438	343	279	300	384
1.4%	A	540	560	620	656	640	621	660
	B	666	394	499	560	520	559	520
	C	377	600	580	599	514	582	522
	D	424	601	412	628	400	540	557
	E	484	561	454	520	511	660	560
	F	493	480	480	402	401	380	580

測定角度85°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	775	861	859	915	994	1059	340
	B	673	722	744	738	840	879	301
	C	703	719	762	738	781	880	340
	D	698	719	754	757	702	898	239
	E	709	718	758	679	735	814	316
	F	720	679	677	700	679	781	362
4.2%	A	480	722	703	741	722	648	243
	B	401	439	620	617	552	560	227
	C	601	658	652	600	540	557	201
	D	515	560	400	552	523	601	200
	E	577	421	664	533	560	602	199
	F	559	530	580	531	541	753	240
1.4%	A	560	726	702	721	781	772	255
	B	420	304	571	605	673	723	200
	C	615	680	602	560	680	740	213
	D	589	461	338	460	580	660	305
	E	560	439	661	521	657	660	241
	F	586	576	638	576	500	423	280

測定角度80°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	306	279	359	321	377	196	90
	B	258	221	279	233	299	140	80
	C	241	220	270	246	320	143	71
	D	240	261	281	280	379	219	79
	E	241	259	239	228	284	139	82
	F	240	265	260	281	276	258	137
4.2%	A	352	242	281	319	200	220	100
	B	60	222	243	260	200	200	103
	C	378	260	212	272	201	202	61
	D	172	65	177	260	248	239	60
	E	160	242	173	290	260	140	98
	F	182	264	240	240	320	140	80
1.4%	A	260	100	180	120	217	60	60
	B	41	109	180	149	220	37	60
	C	180	160	159	99	168	40	48
	D	100	5	93	120	320	66	60
	E	60	200	140	200	200	106	80
	F	100	138	80	118	74	229	44

測定角度75°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	42	40	61	75	40	23	23
	B	41	41	41	60	38	22	21
	C	29	32	48	67	20	11	27
	D	27	38	43	69	28	11	20
	E	27	52	65	64	22	2	5
	F	33	22	39	47	46	8	32
4.2%	A	100	80	60	74	100	8	54
	B	71	77	60	41	98	1	32
	C	121	80	36	48	64	1	24
	D	16	114	77	40	56	1	40
	E	62	45	56	53	60	2	16
	F	29	55	56	104	76	35	32
1.4%	A	61	100	60	140	61	40	25
	B	60	80	31	100	40	20	40
	C	60	60	42	78	68	20	20
	D	1	6	1	148	82	40	23
	E	70	88	81	97	158	28	20
	F	29	53	40	7	127	17	31

測定角度70°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	37	28	30	24	29	2	2
	B	28	21	23	33	3	29	6
	C	32	14	11	16	9	28	4
	D	27	15	25	22	6	14	8
	E	14	47	19	17	10	13	8
	F	53	42	132	229	155	52	68
4.2%	A	73	20	32	9	24	1	40
	B	16	57	17	8	23	8	28
	C	23	32	33	16	23	8	20
	D	32	18	1	14	24	5	17
	E	56	30	28	24	50	1	23
	F	34	16	24	33	31	17	36
1.4%	A	34	11	45	66	27	45	50
	B	15	35	15	63	21	32	23
	C	3	16	27	72	21	14	18
	D	27	17	32	28	11	6	17
	E	40	30	33	97	16	3	19
	F	37	44	22	8	3	6	6

【反射強度分布（mV）】

図 3.3.2-19　異なる含水率の反射強度分布

（コンクリート壁模擬試験体⑦、測定周波数：11.5 GHz）

測定角度90°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	1067	895	696	650	727	897	1154
	B	997	778	518	478	659	858	1040
	C	996	776	519	454	579	778	1056
	D	917	693	498	514	667	881	1017
	E	757	522	499	618	801	980	896
	F	538	667	837	1026	877	658	485
4.2%	A	687	571	1057	1013	568	642	1199
	B	583	402	840	836	420	608	1120
	C	500	488	900	879	387	600	1082
	D	480	578	640	799	400	660	1060
	E	500	911	1023	599	380	841	948
	F	880	1045	540	580	900	781	501
1.4%	A	800	802	908	1060	1135	1240	1420
	B	612	542	760	839	840	1020	1101
	C	781	780	621	841	812	1005	1080
	D	683	730	420	659	717	822	940
	E	1006	860	737	686	540	800	815
	F	1220	1263	1121	1080	1197	660	1020

測定角度85°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	1337	1397	1437	1427	1379	1475	533
	B	1175	1229	1219	1241	1196	1296	459
	C	1122	1191	1217	1174	1182	1252	380
	D	1017	1137	1137	1157	1117	1213	360
	E	978	1016	979	959	992	1039	330
	F	921	939	1037	950	1123	1291	759
4.2%	A	1042	1041	945	818	822	940	580
	B	807	840	740	719	711	880	581
	C	993	819	809	600	719	960	585
	D	885	521	624	713	840	1100	640
	E	698	580	660	760	984	1240	540
	F	780	873	1102	1141	1181	1174	275
1.4%	A	900	1200	1503	1452	1247	1120	318
	B	739	920	1220	1220	1081	920	280
	C	780	980	1236	1260	1155	956	321
	D	859	880	1180	1081	796	856	481
	E	1081	1200	1263	1080	720	821	581
	F	1260	1000	741	700	660	1402	660

測定角度80°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	299	659	439	320	717	298	419
	B	259	562	339	310	610	141	280
	C	201	562	347	299	658	184	201
	D	319	546	260	479	580	181	147
	E	440	538	201	542	540	215	43.3
	F	618	262	500	580	399	519	182
4.2%	A	261	440	321	464	320	353	261
	B	139	465	310	429	353	288	200
	C	259	360	240	380	475	192	152
	D	300	160	500	340	455	160	99.9
	E	439	222	432	120	606	52.4	19.8
	F	500	214	460	320	481	371	139
1.4%	A	400	324	40.2	237	356	3.8	227
	B	113	278	20	240	281	1	79.7
	C	332	285	40.1	279	322	1	40.6
	D	319	200	200	180	268	77.8	1.9
	E	338	120	60	482	68.9	168	1
	F	140	55.1	241	100	60	339	159

測定角度75°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	149	160	143	154	99.8	139	120
	B	159	153	141	132	79.4	99.9	108
	C	179	145	151	119	55.4	153	152
	D	164	151	139	94.7	25.6	168	196
	E	120	83.6	62.4	21.4	6.8	95.9	157
	F	21.9	17.2	28.5	66.6	107	15.5	91.6
4.2%	A	114	40.2	200	80	60	80.2	220
	B	60	40	184	80.1	40.7	61	144
	C	88	32.8	200	95.9	15.1	47.7	120
	D	120	40.7	59.1	144	1	24.4	55.2
	E	176	16.2	184	208	31.7	21.2	16.4
	F	136	144	1	120	200	99.9	87.2
1.4%	A	87.1	59.7	140	81.6	100	3	40
	B	177	37.3	128	83.1	86.5	46	34.3
	C	129	80	75.4	81.7	151	80	60
	D	101	40	220	60	161	110	118
	E	176	8	188	24.5	185	106	190
	F	124	100	128	56.3	288	20.2	217

測定角度70°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
5.7%	A	135	25.2	138	85.7	99.2	40.7	13.4
	B	160	21.4	143	23.2	72.9	24.9	69.3
	C	144	19.2	144	28.4	80	37.7	60.5
	D	148	32.9	184	34.1	84.5	68.3	85.2
	E	122	50.2	105	26.2	28.5	96.5	116
	F	16.7	35.5	27.9	21.5	16.2	16.5	4.7
4.2%	A	29.3	72	32.4	40	40.4	84.7	176
	B	24.5	19.1	48	44.7	75.9	35.2	64.4
	C	46.6	81.6	39.6	89.2	93.9	37.1	56
	D	62	19.2	137	52.8	112	32.3	21.5
	E	104	131	48.5	120	111	24.1	11.4
	F	94.9	89.1	105	109	60.6	112	128
1.4%	A	69	51.2	73.9	68.8	116	92.5	227
	B	76.5	80.4	86.2	93.3	80	96.7	209
	C	79.7	55.8	103	47.1	63.3	114	165
	D	80.5	111	44.2	228	116	149	249
	E	81	17.2	90.7	9.3	38.6	110	187
	F	95.4	45.6	95.9	42.9	87.7	25.5	92.2

【反射強度分布（mV）】

図 3.3.2-20　異なる含水率の反射強度分布

（コンクリート壁模擬試験体⑦、測定周波数：12.3 GHz）

含水率 5.1%

測定角度90°

	1	2	3	4	5	6	7
A	544	361	380	320	440	453	377
B	360	361	360	260	380	437	413
C	381	320	380	267	360	407	318
D	380	360	360	297	340	380	360
E	380	335	340	245	341	380	281
F	396	360	361	275	377	400	380

測定角度85°

	1	2	3	4	5	6	7
A	660	567	696	642	571	612	220
B	500	621	660	583	593	715	220
C	405	520	580	540	581	648	180
D	480	580	656	596	640	680	160
E	441	599	642	580	720	700	180
F	520	582	642	581	707	640	146

測定角度80°

	1	2	3	4	5	6	7
A	580	436	403	420	340	315	146
B	402	421	452	420	302	254	131
C	360	359	460	420	320	236	100
D	429	419	460	460	381	237	117
E	380	400	487	440	320	239	101
F	334	380	463	418	400	240	140

【周波数 9.4 GHz】

含水率 5.1%

	1	2	3	4	5	6	7
A	439	494	660	722	779	752	1001
B	441	563	721	813	781	818	940
C	420	559	660	741	692	779	877
D	396	512	621	746	698	769	869
E	374	441	573	721	719	800	897
F	584	661	701	759	661	746	740

	1	2	3	4	5	6	7
A	738	758	662	520	400	195	1
B	762	760	700	600	432	236	80
C	746	767	700	580	443	240	118
D	780	780	741	680	520	340	148
E	743	761	713	660	544	339	197
F	766	793	781	800	771	662	400

	1	2	3	4	5	6	7
A	54	499	585	99	541	461	289
B	60	440	560	120	382	629	333
C	61	449	580	100	361	625	383
D	60	441	620	180	302	681	400
E	79	481	620	120	380	660	343
F	144	253	674	337	162	660	380

【周波数 10.9 GHz】

含水率 5.1%

	1	2	3	4	5	6	7
A	641	521	634	620	649	581	659
B	520	507	561	579	580	600	621
C	460	440	500	521	502	600	500
D	464	434	500	541	485	591	541
E	500	420	500	521	490	580	540
F	519	478	540	500	480	535	540

	1	2	3	4	5	6	7
A	420	496	462	462	558	563	200
B	461	439	420	480	521	440	159
C	423	426	421	452	477	431	196
D	419	421	475	481	509	479	162
E	418	440	461	428	540	459	140
F	400	417	418	486	515	445	140

	1	2	3	4	5	6	7
A	244	295	334	240	267	321	80
B	279	244	261	230	229	215	45
C	240	200	240	207	192	221	100
D	220	222	280	239	251	261	60
E	231	201	260	258	260	244	60
F	221	220	260	260	258	244	49

【周波数 11.5 GHz】

含水率 5.1%

	1	2	3	4	5	6	7
A	1358	1292	1120	1038	921	845	940
B	1173	1073	924	840	740	640	780
C	1160	1060	900	797	698	580	740
D	1140	1058	938	799	704	624	873
E	1220	1076	981	837	698	567	760
F	1080	907	760	621	640	680	959

	1	2	3	4	5	6	7
A	900	559	500	860	980	695	104
B	840	480	340	751	964	632	220
C	819	399	320	700	905	740	313
D	806	420	321	660	900	824	396
E	780	382	340	687	900	869	360
F	860	620	340	392	680	1013	567

	1	2	3	4	5	6	7
A	88	485	100	609	159	400	120
B	60	562	69	559	80	559	319
C	44	546	60	543	80	540	360
D	42	539	80	584	105	580	440
E	40	600	61	616	120	550	320
F	80	500	174	500	240	380	307

【周波数 12.3 GHz】

【反射強度分布（mV）】

図 3.3.2-21　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑧、測定周波数：9.4～12.3 GHz）

測定角度90°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
4.8%	A	280	280	312	218	276	400	380
	B	311	278	340	239	242	390	416
	C	280	274	326	228	300	346	376
	D	281	258	260	204	320	380	375
	E	241	240	319	220	339	430	420
	F	340	277	340	320	461	523	580
3.6%	A	182	211	246	220	220	320	400
	B	292	269	280	258	279	381	411
	C	280	260	340	260	259	340	460
	D	282	200	300	244	260	320	435
	E	235	240	319	240	240	340	427
	F	380	336	394	407	420	540	560
1.4%	A	307	363	440	360	182	400	360
	B	262	278	284	346	241	260	380
	C	200	281	210	231	240	340	360
	D	200	236	280	260	200	371	340
	E	280	220	260	240	172	260	359
	F	325	280	224	218	160	300	343

測定角度85°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
4.8%	A	740	620	620	597	821	680	201
	B	720	699	620	540	760	639	140
	C	645	648	642	600	801	660	200
	D	640	625	639	606	818	704	182
	E	671	686	660	621	820	760	220
	F	680	702	801	860	939	780	202
3.6%	A	540	714	462	550	776	751	256
	B	529	760	540	560	820	580	200
	C	544	720	623	560	785	680	260
	D	517	718	560	543	776	680	260
	E	520	720	580	540	779	694	241
	F	697	820	660	740	797	820	309
1.4%	A	720	860	764	610	760	795	296
	B	538	660	600	600	640	820	361
	C	630	613	720	583	763	758	296
	D	500	620	601	582	740	701	160
	E	619	620	600	521	760	662	180
	F	501	640	578	620	630	780	212

測定角度80°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
4.8%	A	460	361	404	320	325	226	100
	B	502	480	420	300	360	278	62
	C	480	460	440	296	329	260	100
	D	460	479	461	277	282	297	101
	E	521	516	462	339	340	319	84
	F	521	578	620	424	380	343	100
3.6%	A	440	396	380	340	380	260	83
	B	449	389	420	260	321	329	140
	C	496	430	409	240	313	275	140
	D	466	467	420	340	300	224	100
	E	520	480	400	280	320	260	100
	F	520	500	519	406	420	180	98
1.4%	A	239	365	244	340	344	274	141
	B	280	307	241	308	300	1	138
	C	220	361	200	320	381	220	116
	D	240	368	240	238	359	171	100
	E	268	318	220	300	352	180	80
	F	181	387	285	218	365	241	60

測定角度75°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
4.8%	A	100	80	56	113	20	45	44
	B	80	50	48	55	34	28	27
	C	66	41	51	80	32	31	33
	D	78	74	51	68	51	17	41
	E	71	64	64	97	31	24	52
	F	65	89	86	136	64	24	93
3.6%	A	80	121	100	90	103	3	40
	B	34	80	95	112	96	1	39
	C	95	91	96	112	176	15	31
	D	112	112	136	98	176	11	24
	E	97	127	124	105	135	4	40
	F	117	131	146	140	185	2	54
1.4%	A	18	41	60	99	1	60	69
	B	26	120	71	80	8	42	99
	C	96	117	30	56	15	32	40
	D	56	91	34	64	8	44	86
	E	101	109	91	83	13	32	55
	F	48	89	40	47	61	5	51

測定角度70°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
4.8%	A	71	33	29	82	22	50	48
	B	58	56	32	81	16	43	48
	C	71	41	41	96	8	28	17
	D	44	41	24	105	8	16	16
	E	49	63	23	96	1	32	32
	F	48	64	32	123	8	8	80
3.6%	A	27	79	9	120	38	25	41
	B	27	77	20	148	17	25	63
	C	42	100	27	165	16	18	65
	D	36	93	17	157	19	28	59
	E	41	90	16	150	8	17	102
	F	21	117	31	149	24	36	84
1.4%	A	131	40	40	164	80	7	21
	B	82	128	30	88	96	17	32
	C	67	107	22	88	83	32	8
	D	96	85	62	88	72	32	3
	E	61	55	34	125	51	13	31
	F	68	38	49	72	44	17	107

【反射強度分布（mV）】

図 3.3.2-22　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑨、測定周波数：9.4 GHz）

測定角度90°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
4.8%	A	313	377	446	472	500	592	700
	B	320	354	428	490	500	622	779
	C	302	380	481	573	560	621	780
	D	297	380	499	542	520	604	745
	E	280	363	484	530	526	611	761
	F	520	564	621	720	676	720	874
3.6%	A	420	481	470	460	519	620	750
	B	420	443	535	530	540	620	680
	C	381	404	520	539	555	662	740
	D	361	398	479	504	543	640	701
	E	340	380	485	535	556	600	660
	F	570	580	659	699	685	763	779
1.4%	A	140	160	221	248	384	565	739
	B	188	122	237	260	419	520	710
	C	200	176	261	320	480	645	683
	D	220	164	257	359	481	630	720
	E	201	140	197	301	421	500	640
	F	189	181	380	588	660	761	785

測定角度85°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
4.8%	A	400	567	680	900	940	1023	321
	B	420	603	780	940	936	1002	321
	C	436	620	800	941	980	1041	325
	D	420	659	803	904	941	1055	360
	E	444	626	821	936	955	1006	343
	F	659	880	1000	1021	944	893	180
3.6%	A	788	340	403	906	731	380	360
	B	840	388	465	942	717	440	280
	C	863	401	463	980	760	439	319
	D	845	437	456	941	799	501	240
	E	860	340	513	980	780	501	244
	F	740	380	794	1040	681	412	400
1.4%	A	976	517	520	1021	540	460	639
	B	922	440	481	992	524	523	659
	C	981	520	574	1028	581	460	500
	D	923	460	619	989	529	480	510
	E	910	380	580	980	560	474	580
	F	801	380	821	1040	414	719	620

測定角度80°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
4.8%	A	281	200	658	400	240	660	337
	B	320	200	600	462	180	624	380
	C	320	220	640	451	200	621	376
	D	401	185	616	504	180	660	340
	E	420	182	600	522	182	610	322
	F	615	220	480	707	227	482	351
3.6%	A	200	233	598	200	327	563	286
	B	222	228	580	259	240	600	340
	C	201	260	620	260	261	563	320
	D	243	240	583	296	260	620	364
	E	221	241	600	241	267	604	335
	F	416	200	564	531	160	618	400
1.4%	A	400	58	460	61	460	3	60
	B	447	60	500	40	547	262	23
	C	436	61	480	66	449	20	140
	D	500	41	464	40	460	20	60
	E	522	80	440	80	455	5	100
	F	443	60	482	21	415	81	9

測定角度75°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
4.8%	A	145	34	60	140	240	200	200
	B	180	48	55	112	196	214	184
	C	170	45	48	112	209	226	214
	D	207	48	42	128	222	216	201
	E	183	43	37	118	207	189	188
	F	262	136	26	63	128	152	211
3.6%	A	60	56	158	220	28	69	79
	B	73	45	137	224	27	89	72
	C	61	49	161	256	24	71	72
	D	65	56	184	264	16	40	64
	E	59	71	206	194	18	63	126
	F	128	43	129	271	59	81	56
1.4%	A	21	40	60	88	100	109	81
	B	43	15	40	114	99	108	119
	C	24	28	72	96	105	137	64
	D	32	17	32	89	97	105	40
	E	24	24	63	96	96	120	88
	F	69	67	27	35	56	79	50

測定角度70°

含水率		1	2	3	4	5	6	7
4.8%	A	127	68	72	147	144	192	224
	B	142	70	55	144	150	144	192
	C	152	64	56	121	131	160	191
	D	138	70	63	135	150	160	204
	E	138	72	62	111	142	191	176
	F	136	72	104	184	143	152	176
3.6%	A	81	55	96	169	114	163	180
	B	73	58	92	160	131	155	165
	C	68	58	102	156	119	184	163
	D	75	52	98	152	116	132	164
	E	85	45	75	143	132	149	164
	F	68	43	96	149	108	154	166
1.4%	A	134	34	177	182	48	54	94
	B	148	40	177	192	36	143	80
	C	137	25	173	151	35	20	101
	D	119	43	173	132	48	79	160
	E	173	64	175	173	24	71	168
	F	124	78	236	129	39	68	127

【反射強度分布（mV）】

図 3.3.2-23　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑨、測定周波数：10.9 GHz）

測定角度 90°

		1	2	3	4	5	6	7
含水率 4.8%	A	461	457	459	480	522	543	537
	B	500	456	500	492	526	560	596
	C	500	460	491	520	501	581	557
	D	460	461	499	505	500	590	543
	E	498	440	498	521	523	560	540
	F	600	568	522	620	555	626	624
含水率 3.5%	A	480	495	545	500	500	542	522
	B	500	520	490	519	521	559	564
	C	500	520	500	521	539	580	620
	D	460	529	461	520	540	559	613
	E	460	540	475	541	501	590	580
	F	597	520	542	541	620	581	640
含水率 1.4%	A	340	460	420	440	514	456	562
	B	376	409	367	480	482	541	645
	C	460	438	460	505	480	520	661
	D	400	495	380	557	510	497	600
	E	349	502	420	542	420	560	578
	F	380	500	557	579	600	621	660

測定角度 85°

		1	2	3	4	5	6	7
含水率 4.8%	A	606	620	598	657	580	680	240
	B	599	600	640	648	600	652	260
	C	600	602	620	640	646	680	260
	D	615	600	600	640	593	701	240
	E	597	621	620	638	600	680	236
	F	629	620	639	620	601	672	300
含水率 3.5%	A	520	589	676	680	535	580	180
	B	535	551	640	644	560	620	238
	C	549	561	625	640	564	660	199
	D	540	563	629	642	560	600	236
	E	520	540	640	645	544	619	221
	F	560	600	722	760	578	648	310
含水率 1.4%	A	601	500	540	660	541	623	313
	B	540	501	628	660	561	640	301
	C	595	543	625	681	540	732	305
	D	593	520	659	634	522	660	319
	E	624	500	626	680	540	656	301
	F	720	689	760	587	660	837	282

測定角度 80°

		1	2	3	4	5	6	7
含水率 4.8%	A	287	258	240	285	239	279	70
	B	275	259	240	331	260	280	60
	C	280	281	240	298	241	260	62
	D	280	287	259	336	236	237	65
	E	292	281	220	287	200	240	104
	F	282	324	255	359	260	232	120
含水率 3.5%	A	261	220	279	230	184	255	60
	B	257	180	240	267	185	281	105
	C	265	222	248	240	175	267	76
	D	260	210	248	258	202	281	40
	E	253	180	258	219	160	240	120
	F	280	300	253	279	171	268	120
含水率 1.4%	A	120	100	147	120	220	60	40
	B	79	140	131	140	195	61	80
	C	120	140	140	140	204	40	109
	D	90	181	180	128	240	60	96
	E	85	180	140	99	218	42	109
	F	140	183	121	161	275	55	58

測定角度 75°

		1	2	3	4	5	6	7
含水率 4.8%	A	42	60	49	82	80	20	20
	B	60	42	40	80	107	16	8
	C	56	48	40	72	80	31	3
	D	53	41	39	72	88	21	1
	E	56	58	48	56	80	32	24
	F	73	51	71	64	104	33	16
含水率 3.5%	A	76	40	59	80	40	1	20
	B	56	48	40	55	24	1	40
	C	57	48	58	56	32	1	47
	D	62	45	35	60	29	1	32
	E	47	48	59	61	23	8	56
	F	64	67	40	72	32	1	26
含水率 1.4%	A	60	60	74	58	77	12	1
	B	118	56	82	40	52	40	48
	C	110	88	64	71	96	20	8
	D	138	54	63	42	71	40	1
	E	95	64	57	43	85	18	33
	F	177	49	92	47	65	1	21

測定角度 70°

		1	2	3	4	5	6	7
含水率 4.8%	A	8	10	9	9	12	5	8
	B	7	7	15	2	16	1	4
	C	2	7	11	5	15	6	30
	D	4	8	8	3	16	1	17
	E	1	2	13	3	9	1	23
	F	9	8	12	16	22	4	4
含水率 3.5%	A	8	13	9	16	21	12	12
	B	20	8	17	18	28	1	13
	C	12	12	16	12	35	1	9
	D	11	12	9	7	31	1	3
	E	5	14	8	9	29	1	7
	F	20	16	16	24	25	8	7
含水率 1.4%	A	9	42	40	22	8	5	21
	B	10	12	51	25	8	40	8
	C	19	15	36	16	4	1	44
	D	28	32	27	16	6	1	40
	E	36	45	17	13	20	6	43
	F	39	32	29	24	12	3	22

【反射強度分布（mV）】

図 3.3.2-24　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑨、測定周波数：11.5 GHz）

測定角度 90°

		1	2	3	4	5	6	7
含水率 4.8%	A	1079	1043	960	920	840	809	838
	B	1101	1079	949	900	803	700	758
	C	1110	1044	973	940	842	739	820
	D	1120	1059	986	917	860	740	799
	E	1120	1022	921	891	820	780	820
	F	1067	920	820	742	682	615	704
含水率 3.5%	A	920	840	810	780	720	639	760
	B	946	843	820	759	716	693	780
	C	940	881	840	840	773	740	820
	D	924	922	821	780	779	740	846
	E	990	920	840	861	837	843	947
	F	860	760	740	737	740	750	900
含水率 1.4%	A	1140	1120	1098	1100	920	902	864
	B	1160	1187	1102	1080	983	860	760
	C	1021	1100	1101	1141	1100	1020	986
	D	1097	1098	1120	1079	980	966	1100
	E	1141	1140	1119	1080	1040	1024	1139
	F	1228	1100	920	880	866	639	695

測定角度 85°

		1	2	3	4	5	6	7
含水率 4.8%	A	460	520	520	618	600	686	100
	B	520	546	589	600	621	680	139
	C	520	560	540	587	600	660	99
	D	540	581	589	575	592	699	140
	E	535	540	544	565	620	661	123
	F	755	820	820	720	699	681	275
含水率 3.5%	A	1156	1139	900	784	861	1213	663
	B	1153	1120	941	760	927	1220	600
	C	1217	1140	900	799	940	1220	639
	D	1200	1159	942	820	866	1149	679
	E	1220	1100	899	780	908	1179	640
	F	1220	1080	860	840	1140	1403	662
含水率 1.4%	A	1080	1280	1021	800	960	1419	441
	B	1112	1260	1061	780	1100	1389	427
	C	1060	1280	1080	840	1180	1440	380
	D	1060	1300	1000	814	1100	1441	503
	E	1080	1340	1041	800	1142	1440	460
	F	1218	1200	800	982	1240	1380	390

測定角度 80°

		1	2	3	4	5	6	7
含水率 4.8%	A	299	447	321	460	400	402	380
	B	324	420	383	361	500	280	420
	C	340	390	428	380	460	260	345
	D	401	342	473	300	504	238	440
	E	420	360	452	340	439	280	340
	F	545	198	630	141	580	100	243
含水率 3.5%	A	200	420	203	541	220	443	293
	B	205	420	238	500	220	459	368
	C	234	414	260	442	243	377	349
	D	240	400	237	445	180	420	367
	E	200	428	220	466	182	381	400
	F	372	299	410	242	418	241	420
含水率 1.4%	A	440	240	18	360	280	20	69
	B	441	200	60	336	177	42	1
	C	419	238	24	400	243	43	38
	D	450	146	62	339	170	40	59
	E	455	264	60	376	300	1	99
	F	559	62	160	368	122	60	1

測定角度 75°

		1	2	3	4	5	6	7
含水率 4.8%	A	180	61	240	1	223	109	37
	B	201	32	224	9	214	176	56
	C	211	25	224	15	200	150	33
	D	224	31	253	11	205	136	33
	E	205	12	232	15	223	134	22
	F	215	17	201	104	142	224	40
含水率 3.5%	A	120	60	81	157	20	95	120
	B	146	113	91	176	11	104	229
	C	124	68	76	152	16	100	168
	D	112	64	66	133	8	88	139
	E	136	56	48	167	1	100	218
	F	136	39	115	102	40	70	224
含水率 1.4%	A	40.2	38.1	196	7.1	60	100	242
	B	80.4	31.7	136	28.6	24.1	63.4	208
	C	104	36.9	194	40.2	56.6	63.6	270
	D	71.6	55.7	184	32.3	72.1	40.1	328
	E	46.4	71.2	151	22.7	80.1	80	251
	F	60.3	30.8	232	127	37.7	40.2	191

測定角度 70°

		1	2	3	4	5	6	7
含水率 4.8%	A	87	75	113	144	136	72	80
	B	86	64	111	160	139	97	88
	C	71	66	112	144	112	96	62
	D	61	73	136	137	112	87	92
	E	45	87	121	144	125	105	168
	F	87	70	95	142	147	81	111
含水率 3.5%	A	82	32	32	73	92	66	144
	B	47	21	16	70	72	34	69
	C	66	31	39	72	84	42	139
	D	48	23	33	73	65	41	186
	E	48	28	46	74	66	28	146
	F	63	33	32	51	74	28	94
含水率 1.4%	A	77	51	53	32	56	151	177
	B	32	34	32	26	33	152	306
	C	86	86	9	37	27	139	137
	D	59	48	30	44	30	224	188
	E	32	31	13	25	30	169	252
	F	104	39	28	48	23	109	150

【反射強度分布（mV）】

図 3.3.2-25　異なる含水率の反射強度分布
（コンクリート壁模擬試験体⑨、測定周波数：12.3 GHz）

	1	2	3	4	5	6	7
A	5.6	5.9	5.5	5.9	5.9	5.7	5.7
B	5.9	5.5	5.8	5.8	5.2	5.7	5.7
C	5.7	5.7	6.0	5.7	5.8	5.8	5.6
D	5.8	5.5	5.3	5.6	5.4	5.7	5.8
E	5.7	5.9	5.7	5.9	5.7	5.8	5.5
F	5.8	5.7	5.8	6.1	5.7	5.5	5.8

平均 5.7%，変動係数 3.1%

1	2	3	4	5	6	7
3.9	4.0	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1
4.1	コア	4.2	4.3	4.2	4.3	4.2
4.1	4.2	4.2	4.3	4.1	4.1	4.1
4.1	4.2	コア	4.1	4.3	4.3	4.3
4.1	4.2	4.2	4.1	4.3	4.3	4.3
4.1	4.1	4.3	4.3	4.3	4.4	4.4

平均 4.2%，変動係数 2.5%

1	2	3	4	5	6	7
0.7	0.6	1.1	1.2	1.3	1.3	1.1
0.9	コア	1.3	1.8	1.9	2.0	1.5
0.9	1.2	1.2	1.6	1.7	1.9	1.5
1.1	1.3	コア	1.4	コア	1.9	1.6
1.2	1.6	1.5	1.7	1.8	1.9	1.5
1.2	1.2	1.6	1.3	1.6	コア	1.1

平均 1.4%，変動係数 24.3%

【コンクリート壁模擬試験体⑦，無筋コンクリート】

	1	2	3	4	5	6	7
A	5.1	5.0	4.9	4.9	4.9	5.1	5.2
B	4.8	5.1	5.0	5.1	5.1	5.2	5.1
C	5.0	5.0	5.0	5.2	5.1	5.0	5.2
D	5.3	5.2	5.1	4.9	5.1	5.2	5.0
E	5.4	5.2	5.2	5.3	5.4	5.2	5.2
F	5.4	5.2	5.3	5.2	5.2	5.4	5.0

平均 5.1%，変動係数 2.9%

【コンクリート壁模擬試験体⑧，均等配筋】

	1	2	3	4	5	6	7
A	4.8	4.9	5.0	5.0	4.9	4.9	5.0
B	4.3	4.8	4.8	4.8	4.9	5.0	4.6
C	4.9	4.6	4.8	4.8	4.8	4.8	4.7
D	4.8	5.0	4.9	5.0	4.8	5.0	4.7
E	4.9	4.8	5.1	4.9	4.7	5.0	4.8
F	4.8	4.9	4.8	5.0	4.9	4.8	4.8

平均 4.8%，変動係数 2.9%

1	2	3	4	5	6	7
3.7	3.8	3.8	3.6	3.6	3.5	3.2
3.6	3.8	3.8	3.7	3.6	3.5	3.2
3.7	3.7	3.8	3.7	3.6	3.5	3.2
3.8	3.7	3.7	3.7	3.7	3.5	3.1
3.8	3.7	3.7	3.7	3.7	3.5	3.1
3.5	3.5	3.7	3.4	3.6	3.4	2.6

平均 3.6%，変動係数 6.8%

1	2	3	4	5	6	7
1.0	1.4	1.6	1.5	1.5	1.6	1.3
1.1	1.4	1.5	1.6	1.7	1.6	1.3
1.2	1.5	1.6	1.7	1.8	1.7	1.3
1.1	1.3	1.5	1.7	1.7	1.6	1.4
1.1	1.4	1.5	1.5	1.6	1.3	1.3
0.9	0.8	0.9	1.0	0.9	1.0	0.7

平均 1.4%，変動係数 20.7%

【コンクリート壁模擬試験体⑨，不均等配筋】

図 3.3.2-26　接触型電気抵抗式含水率計による含水率分布

（c）端島（軍艦島）構造物における測定結果

端島（軍艦島）構造物を対象とした反射強度分布と含水率分布を図 3.3.2-27 に示す。サブテラヘルツ波光学系測定装置による反射強度分布に示される数値は，サブテラヘルツ波光学系測定装置から得られる反射強度を示し、カラースケールは白＜青の順で反射強度が高くなることを示す。また、接触型電気抵抗式含水率計による含水率分布に示される数値は，含水率計に示される指示値であり、カラースケールは含水率計が示す指示値 0～6%を白～青で示す。

端島（軍艦島）構造物は、建設当時の施工や自然劣化によって、コンクリート表面の粗さが均質ではなく、型枠の凹凸やコンクリート表面に骨材が現れている状況である。測定時の含水率は3.2～4.7%とばらつきが認められる。一方、サブテラヘルツ波光学系測定装置による反射強度分布は、含水率が低い測定点の反射強度は低く、含水率がおおよそ 4%を超えると相対的に高い反射強度が得られており、含水率との対応関係が認められる。このことから、コンクリート表面の凹凸は、コンクリート面と測定角度が概ね 90° である限り、サブテラヘルツ波光学系測定装置の測定結果に影響を及ぼす可能性は小さいものと推測される。

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
A	340	480	520	348	880	641	681
B	600	797	900	480	720	820	760
C	560	480	400	366	523	620	540

【サブテラヘルツ波光学系測定装置による反射強度分布（mV）】

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
A	3.5	4.2	3.8	3.7	3.6	4.7	3.9
B	3.4	4.0	4.0	3.4	3.7	3.8	3.6
C	3.3	4.4	3.9	3.2	3.7	4.4	4.0

【接触型電気抵抗式含水率計による含水率分布(%)】

図 3.3.2-27　端島（軍艦島）構造物の反射強度分布及び含水率分布

3）サブテラヘルツ波光学系測定装置の適用性

前述の内部劣化及び含水率の試験体を踏まえサブテラヘルツ波光学系測定装置と既存測定技術の測定結果を比較し、構造物を対象としたサブテラヘルツ波光学系粗測定装置の適用性・適用範囲の整理を行う。

既存測定技術（電磁波レーダ、超音波イメージスキャナー、赤外線サーモグラフィー及び打音法）による内部劣化の検知は、個々に特長を持つ測定技術となるが、どの装置においてもひび割れ幅の検知は難しく、内部に発生した劣化の範囲や発生位置の深さの特定に優れた能力を持つことが分かる。

サブテラヘルツ波光学系測定装置は、自ら光源を持つことで測定環境に依存しない測定が可能であり、赤外線サーモグラフィーで困難であった室内環境でも測定ができる適用性を持つ。この装置から反射強度を得ることで、コンクリート表面を走らせて測定する電磁波レーダと類似した結果が得られた。また、RC 構造物の劣化をコンクリート表層側から進行するものと仮定した時、健全部の反射強度と相対比較することで、ひび割れ幅の特定の可能性も持つと考えられる。しかし、ひび割れの発生方向によって、検知できないひび割れの存在も分かった。

既存測定技術（接触型電気抵抗式含水率計）と比較すると、含水率と反射強度の関係は概ね一致する関係があり、選定された周波数のうち 12.3 GHz が含水率推定に適する周波数であることが分かった。この関係は、接触型電気抵抗式含水率計の測定領域（コンクリート表面から 1～2 cm）と電磁波の測定領域が一致したことに由来するものと考えられる。

このことから、距離における適用範囲は、赤外線サーモグラフィーのような長距離による測定性能と電磁波レーダの測定性能を併せ持つ測定系であると考えられ、内部劣化をコンクリート表面と並行に発生したひび割れの検知と限定した時、本研究で用いたサブテラヘルツ波光学系測定装置は測定距離 240 cm 程度まで測定でき、幅広い適用が可能と推測される。

測定角度の適用範囲は、内部劣化と含水率測定ともに、測定角度によって鉄筋の影響を示唆する結果が得られた。しかし、測定角度 90±5°以内に抑えることで鉄筋の影響を概ね無視できる傾向も示した。したがって、コンクリートの状態を適切に評価するためには、測定角度を 90±5°に抑えて測定することが望ましいという結果となった。

3.3.3　材料劣化特性に基づく部材の耐震性能評価（再委託先：大阪公立大学）

【令和 4 年度～令和 5 年度】

【令和 4 年度までの概要】

令和 4 年度では、せん断破壊先行型耐震壁の既往の実験に対する FEM モデルを作成し、解析結果が実験結果の耐力・剛性・破壊モードを精度良く再現できることを確認した。壁要素内のコンクリートが損傷している場合を想定し、損傷箇所と損傷程度（壁要素内における任意箇所のコンクリート強度やヤング係数の一律低下）を変数とした有損傷モデルを複数作成し、パラメトリック解析を実施した。各有損傷モデルと無損傷モデルの比較を通じて、コンクリートの損傷箇所・程度が耐震壁の構造特性劣化に与える影響を評価した。

【令和 5 年度実施内容及び結果】

(1) はじめに

ここでは、3.3.1 項で得られたひび割れたコンクリートの材料試験から得られた力学特性を用いて、損傷を有する RC 耐震壁の残存性能について、3 次元 FEM 解析により定量的に評価する。また、これらを簡易に判別可能な耐震性能評価マトリクスを作成する。なお、本解析には、汎用コード DIANA10.5 を[3.3.3-1]用いて行った。

(2) ひび割れを有するコンクリートの圧縮応力－ひずみ関係

図 3.3.3-1 に、ひび割れたコンクリートの応力－ひずみ曲線を示す。直径 100 mm×高さ 200 mm の円柱供試体に対し、事前に、損傷を与えるための急速凍結融解サイクルを与えた。その後、一軸圧縮試験を行った結果として、サイクル数別の応力－ひずみ関係を示している。サイクル数 0 は無損傷である。サイクル数が 20 を超えた供試体は、最大圧縮応力の低下及び応力が上昇し始めるひずみの増大が顕著であった。この挙動の詳細として、応力上昇時のひずみ度の増加は、事前に与えた損傷（ひび割れ）が影響しており、荷重が加わってひび割れが閉じるまではひずみのみが上昇し、ひび割れが閉じ切ると圧縮応力が働き始めたものと考えられる。その後は無損傷に比べ低い最大強度を示し、応力が少し低下したところで終局を迎えた。

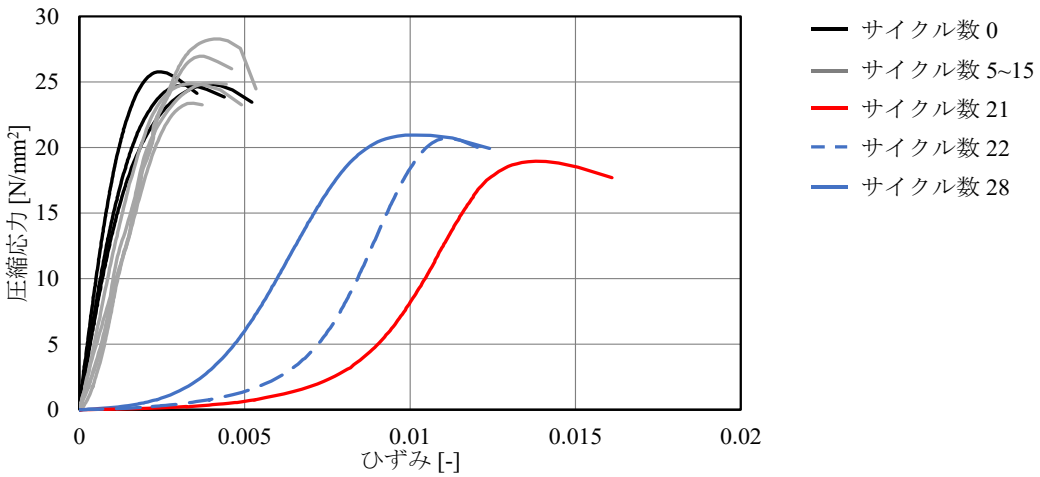


図 3.3.3-1　ひび割れたコンクリートの応力－ひずみ曲線

(3) ひび割れの影響による力学特性劣化程度の評価

ひび割れの影響によるコンクリートの圧縮強度やヤング係数など力学特性の劣化程度を既往研究[3.3.3-1]の材料試験結果に適用し、材料構成則を設定する。本項では凍結融解のサイクル数 0 のひび割れがない試験体とひび割れを有する試験体、特にサイクル数 21 以降の試験体との圧縮応力、ヤング係数などの複数のパラメータを定量的に評価することでひび割れの影響によるコンクリートの力学特性の劣化程度を検討した。

検討するパラメータは図 3.3.3-2 に示す 7 つとした。ひび割れを有する試験体の圧縮強度 $_d\sigma_c$、圧縮強度時ひずみ $_d\varepsilon_c$、ヤング係数 $_dE$、初期ひずみ $_d\varepsilon_0$、ピーク後のひずみの伸び率 $_d\varepsilon_u$、初期応力 $_d\sigma_0$ 及び終局時圧縮応力度 $_d\sigma_u$ である。なお、ヤング係数 $_dE$ は圧縮強度 $_d\sigma_c$ の 1/3 倍及び 2/3 となる応力の点を結ぶ割線剛性とした。初期ひずみ $_d\varepsilon_0$ は、凍結融解のサイクル数 15 以下の試験体では見られなかったため、サイクル数 21 以降の試験体の値のみで検討した。初期応力 $_d\sigma_0$、終局応力 $_d\sigma_u$ は同じサイクル数の試験体の圧縮強度 $_d\sigma_c$ に対する比で評価した。

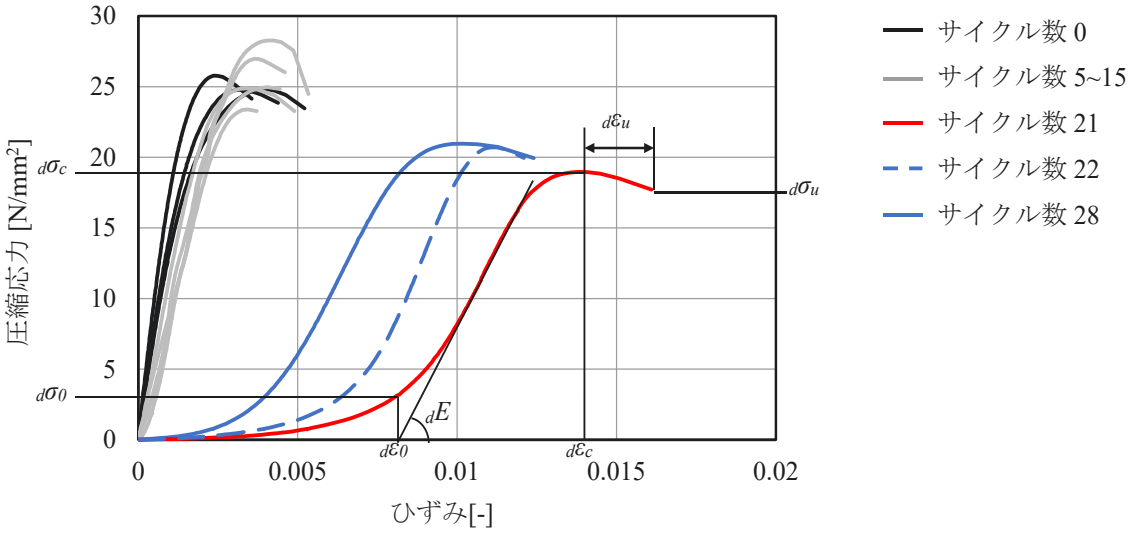


図 3.3.3-2　ひび割れによる材料特性劣化

凍結融解サイクル数に対する、上記で抽出した 7 つのパラメータについてひび割れのない試験体との比を算出し、これと凍結融解サイクル数の関係を図 3.3.3-3 に示す。凍結融解のサイクル数が 15 以下の値を灰色の点、サイクル数が 21 以降の値を赤色の点、青線は各凍結融解サイクル数での平均値の推移を示している。

サイクル数が 21 以降の試験体のヤング係数 $_dE$ は、ひび割れのない試験体のヤング係数 E に対し、最小でおよそ 25%程度まで低下する傾向が見られた。同様に、サイクル数が 21 以降の試験体の圧縮強度 $_d\sigma_c$ は無損傷に対し 80%程度、ピーク後のひずみの伸び率 $_d\varepsilon_u$ は、2 倍程度に変化（劣化）する傾向が見られた。以上、ひび割れによるコンクリートの性能劣化は、初期ひずみ $_d\varepsilon_0$ の比を除き、ある損傷レベル（凍結融解サイクルで 20 程度）から概ね一定に収束する傾向が見られた。

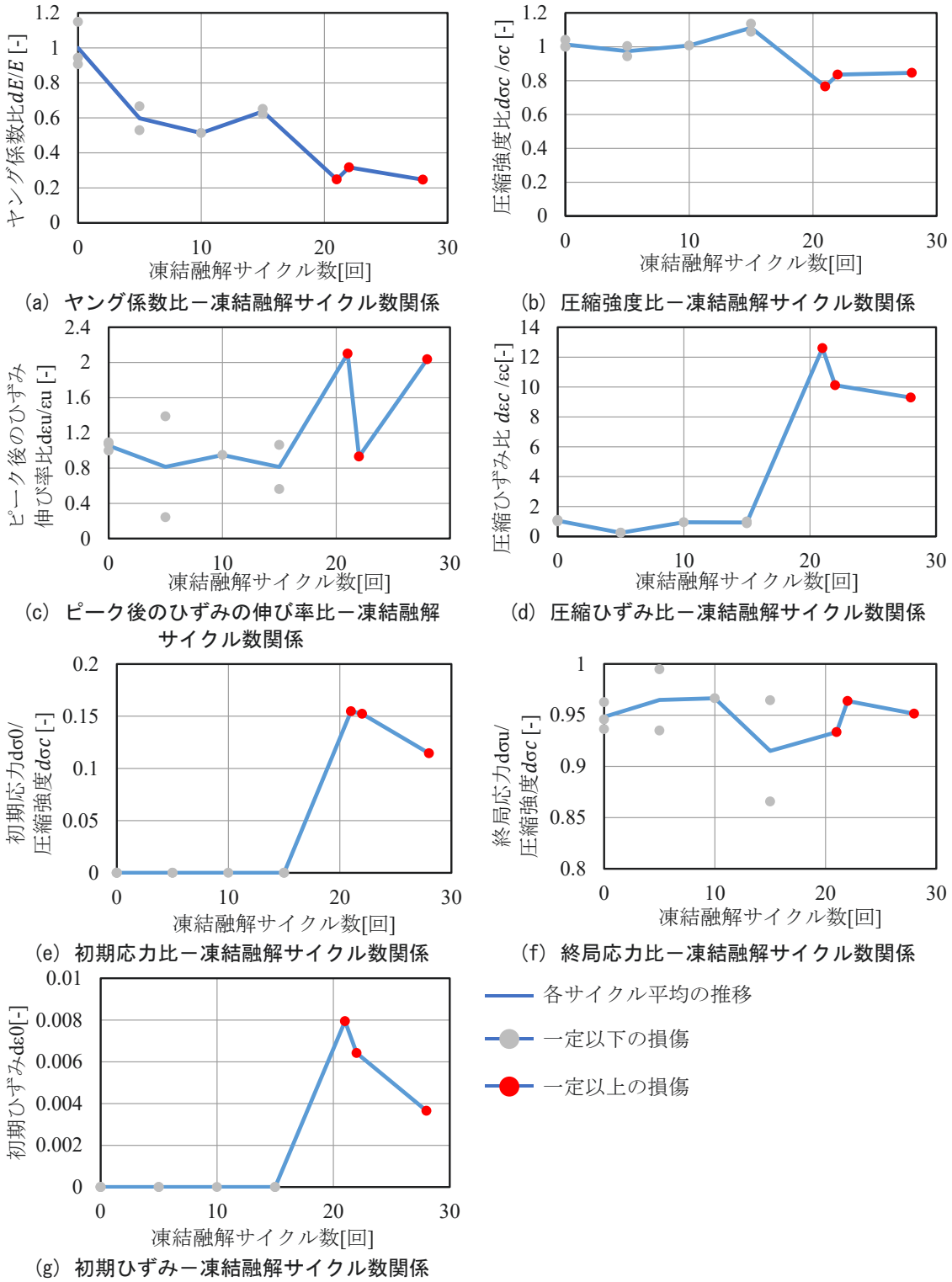


図 3.3.3-3　コンクリートの損傷程度（凍結融解サイクル数）と力学特性劣化の関係

(4) 材料劣化を考慮したRC造耐震壁のFEM解析の概要

ここでは、(3)までで評価したひび割れによるコンクリートの力学特性劣化程度を考慮した材料構成則を設定し、それを適用したRC耐震壁（有損傷モデル）のFEM解析を通じて、壁面の損傷程度及び損傷箇所が耐震壁の部材性能に及ぼす影響を定量的に評価する。

① 損傷段階（損傷程度と損傷箇所）の設定

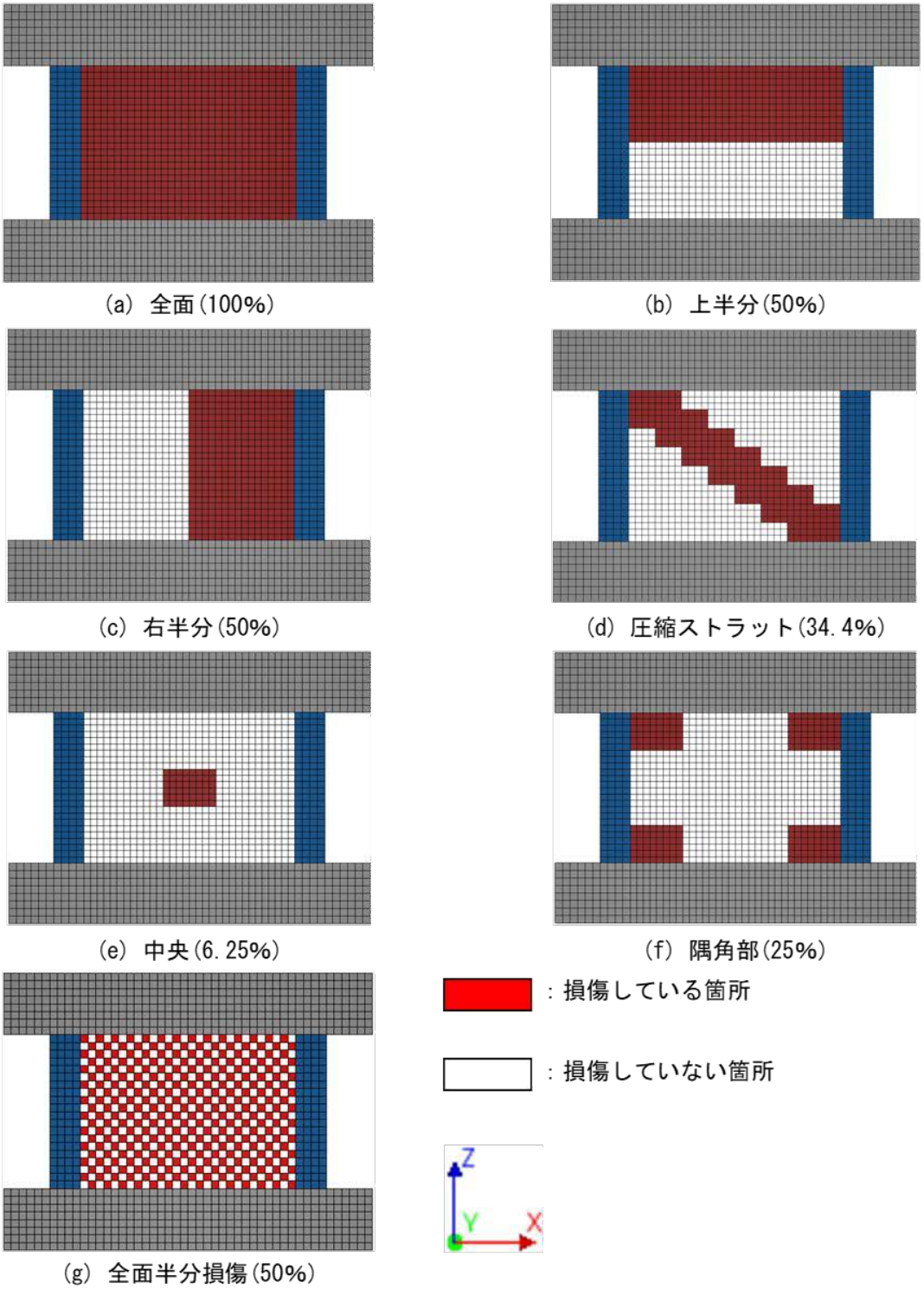
表3.3.3-1に、本検討で仮定した材料の損傷程度と有損傷モデルの材料構成則で設定する各特性の関係を示す。仮定した損傷程度は、「軽微」～「大」の4段階とし、「軽微」、「小」はコンクリートの材料特性のみが劣化した場合、「中」、「大」はコンクリートの劣化に加え、壁筋の付着強度も劣化した場合を想定し設定した。特に、「大」は、対象部材である建屋耐震壁が地震動や水素爆発を受けた後、塩害や中性化などの経年による材料特性劣化を受け、壁筋とコンクリートの付着が著しく低下した（付着強度がほぼ0の）場合を想定している。

図3.3.3-4に、本検討で仮定した壁面の損傷箇所を示す。損傷箇所は、壁要素の全面、及び上、右の半面にそれぞれ損傷を有する場合に加え、壁面の隅角部、また無損傷時の主要な水平力抵抗機構と想定されるストラット方向ならびにストラットが通る壁面中央部の6パターンに加え、壁面全体に損傷が分散している、全面半分の計7パターンとした。なお、損傷の壁厚さ方向は同一レベルの損傷を有すると仮定した。

本項では、以上に記した損傷程度4パターンと損傷箇所7パターンを組み合わせた28パターンに、無損傷モデルを加えた計29パターンのRC造耐震壁のFEMモデルを作成し、無損傷に対する各有損傷モデルの部材性能劣化程度について定量的に評価する。

表3.3.3-1　材料の損傷程度と材料構成則で設定する各特性の関係

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2"></td><td colspan="2">構成則で設定する各特性</td></tr>
<tr><td>コンクリートの力学特性</td><td>コンクリート－鉄筋間の付着</td></tr>
<tr><td rowspan="4">損傷程度</td><td>「軽微」</td><td>後述の図3.3.3-8</td><td>完全付着</td></tr>
<tr><td>「小」</td><td>後述の図3.3.3-9</td><td>完全付着</td></tr>
<tr><td>「中」</td><td rowspan="2">後述の図3.3.3-10</td><td>劣化した圧縮強度 ${}_d\sigma_c$ に応じて低減
後述の図3.3.3-12</td></tr>
<tr><td>「大」</td><td>付着強度なし</td></tr>
</table>

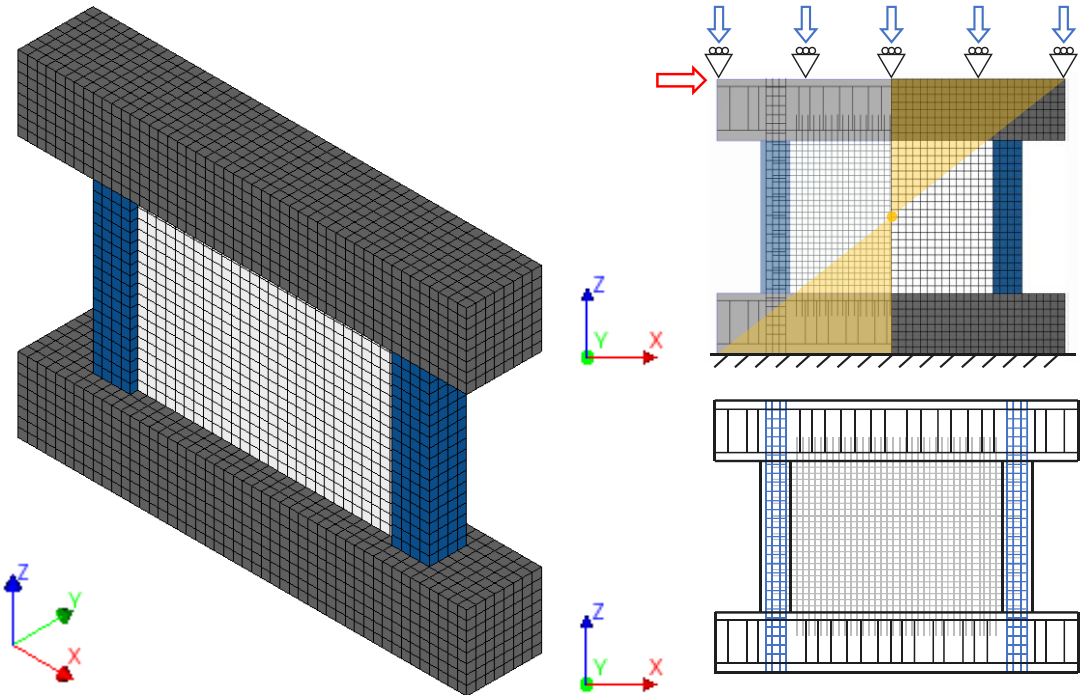


※（　）内の数値は壁面全面積に対する損傷箇所面積の割合

図 3.3.3-4　壁面における仮定した損傷箇所

② 解析モデル

図 3.3.3-5 に、解析モデル及び境界条件を示す。解析対象は、耐震壁の応答変形に対する損傷量を定量的に評価する方法の提案ならびに被災度区分判定等に利用できる耐震壁の実用的な損傷量評価指標の構築を目的に実施されたせん断破壊先行型の RC 造耐震壁であり、その詳細については、令和 4 年度成果報告書 3.3.3 項及び参考文献[3.3.3-1]を参照されたい。壁、柱、スタブのコンクリートは 6 面体 Solid 要素で、壁、柱、スタブ鉄筋は 2 節点 Beam 要素でそれぞれモデル化した。壁幅止め筋、PC 鋼棒（Prestressed Concrete Steelbar：プレストレスト・コンクリート鋼棒）のモデル化は省略した。境界条件として、下スタブ底面の全節点を完全拘束、上スタブ頂部の全節点は回転のみを拘束した。載荷方法として、上スタブ頂部の全節点に-Z 方向に 0.5 N/mm^2 の一定軸力を与えた後、+X 方向に急激に耐力低下が起きるまで強制変位を与える一方載荷とした。解析は単調載荷とし、また、載荷時に上スタブ頂部全節点が Z 方向に同一の変形をするよう設定することで上下スタブを平行に保ち、壁高さ方向の中央に反曲点が生じるようにした。



(a) 要素分割図（アイソメトリック）　　(b) 境界条件及び配筋図

図 3.3.3-5　解析モデル

③ 材料構成則

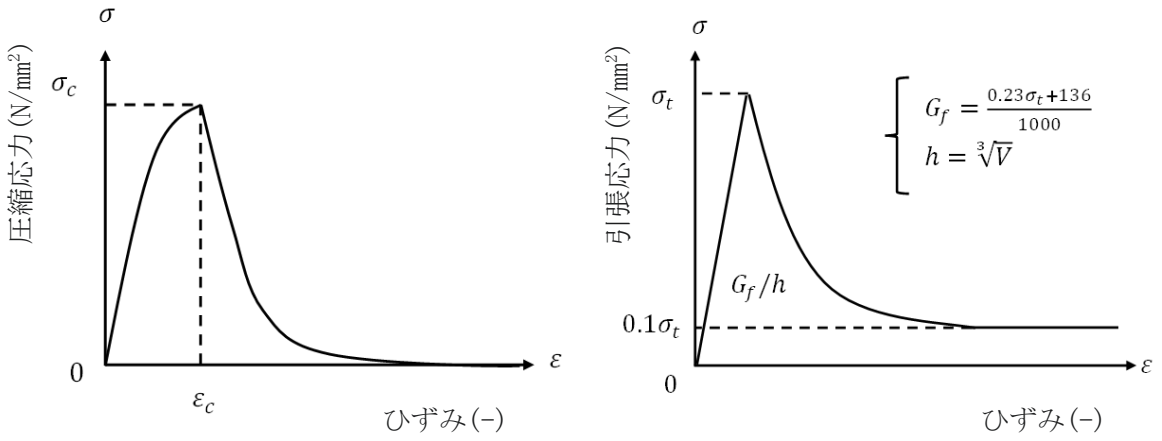
1) 無損傷モデル

壁・柱部分のコンクリートは全ひずみひび割れモデルを用いた。図 3.3.3-6(a)に、コンクリートの圧縮側構成則を示す。圧縮挙動はコンクリート標準示方書準拠モデル[3.3.3-3]を用いた。横拘束効果による圧縮強度の上昇を Hsieh-Ting-Chen のモデル[3.3.3-4]により、コンクリートの横方向ひび割れによる圧縮強度の低減は Vecchio and Collins 1993 のモデル[3.3.3-5]より評価した。図 3.3.3-6(b)に、コンクリートの引張側構成則を

示す。Hordijk モデル[3.3.3-6]を用いた。なお、残留引張強度は 1/10 とし、引張破壊エネルギーGf は参考文献[3.3.3-7]に基づく式とした。スタブ部分のコンクリートは線形弾性等方性モデルを用いた。コンクリートの材料特性は材料試験結果[3.3.3-2]に基づき、表 3.3.3-2 に示す値を用いた。

壁縦筋、壁横筋、柱主筋、柱帯筋は、それぞれ Von-Mises の降伏条件に従う塑性モデルのバイリニア型を用いた。また、塑性硬化は塑性ひずみ－降伏応力関係、硬化仮定はひずみ硬化とした。スタブ主筋、スタブ帯筋については、実験で未降伏であったため、線形弾性等方性モデルを用いた。各鉄筋の材料特性は材料試験結果[3.3.3-2]に基づき、表 3.3.3-3 に示す値を用いた。

コンクリート－鉄筋間の付着は完全付着とした。



(a) 圧縮側　　(b) 引張側

図 3.3.3-6　コンクリートの材料構成則

表 3.3.3-2　コンクリートの材料特性

		値
材齢(日)		61
密度(t/mm³)	ρ	2.40×10^{-9}
ポアソン比(-)	ν	0.2
ヤング係数($\times10^4$N/mm²)	E	3.28
圧縮強度(N/mm²)	f_c	40.2
引張強度(N/mm²)	f_t	3.46
引張破壊エネルギー(N/mm)	G_f	$G_f=\dfrac{0.23f_t+136}{1000}$

表 3.3.3-3　鉄筋の材料特性

	降伏強度(N/mm^2)	ヤング係数(×10^{4}N/mm^2)
	σ_y	E_s
壁縦筋・横筋 D6(SD295)	362	17.2
柱帯筋 D10(SD345)	364	18.1
スタブ帯筋 D13(SD390)	－	20.5
柱主筋 D16(SD345)	393	19.1
スタブ主筋 D22(SD390)	－	20.5

2）有損傷モデル

図 3.3.3-7 及び表 3.3.3-4～表 3.3.3-6 に、損傷程度「軽微」、「小」、「中」、「大」における、コンクリートの応力ひずみ関係及び材料特性を示す。表中の各材料特性は、前述の「(3) ひび割れの影響による力学特性劣化程度の評価」で得られた結果を用いて算出した。なお、「中」及び「大」は壁筋の付着強度のみ異なるとしているため、コンクリートの特性は同等である。また、初期ひずみ $_d\varepsilon_0$ については、損傷程度（凍結融解サイクル数）に応じた定量的な値を見出すことが困難であったため、材料試験値そのものを採用し、それぞれ $_d\varepsilon_0$ = 0.15、0.37、0.79%とした。以上より、損傷したコンクリートの圧縮側構成則を設定する。

図 3.3.3-8～図 3.3.3-10 に、予め損傷（「軽微」、「小」、「中」及び「大」）を有するコンクリートの圧縮側構成則を示す。圧縮側の挙動は、マルチリニア型曲線を用いてモデル化した。表 3.3.3-7～表 3.3.3-9 に、マルチリニア曲線を形成する各特性点を示す。これらは図 3.3.3-7 及び表 3.3.3-4 で示した材料特性を満足するように設定している。

図 3.3.3-11 に、損傷を有するコンクリートの引張側構成則を示す。ひび割れたコンクリートは引張強度 $_d\sigma_t$ を十分に発揮できない。よって、損傷程度「軽微」、「小」、「中」、「大」に関わらず、最大引張強度を圧縮強度 $_d\sigma_t$ の 0.1 倍としてバイリニア型の完全弾塑性としてモデル化した。

各鉄筋の構成則及び材料特性は、無損傷モデルと同等とした（有損傷モデルにおいて鉄筋単体に対する劣化は与えていない）。

無損傷モデル、有損傷モデル「軽微」及び「小」については、壁筋がコンクリートに完全付着していると設定しているが、有損傷モデル「中」、「大」については、壁筋の付着劣化を考慮している。図 3.3.3-12 に「中」、「大」に適用したコンクリート－壁筋（縦筋及び横筋）間の付着応力－すべり関係を示す。同関係は、CEB-FIB Model Code 2010[3.3.3-8]でモデル化した。最大付着応力度 τ_{max} について、損傷程度「中」の場合は図中の式の通り $_d\sigma_c$ を用いて評価し、損傷程度「大」の場合は付着なしとするため 0 に極めて近い値を入力した（0 を入力すると収束計算が不可となる。）。壁筋以外の柱及びスタブの鉄筋については完全付着としている。

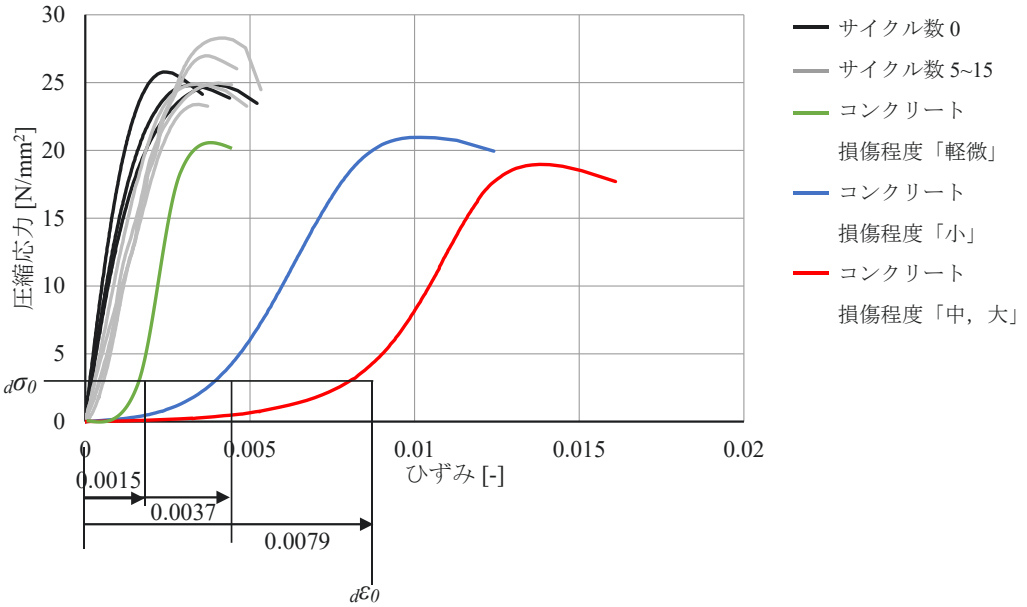


図 3. 3. 3-7　各損傷程度におけるコンクリートの応力ひずみ関係

表 3. 3. 3-4 損傷程度「軽微」の
コンクリートの材料特性

密度(t/mm³)	ρ	2.40×10^{-9}
ポアソン比(-)	ν	0.2
ヤング係数 (×10⁴N/mm²)	$_dE$	0.82
初期ひずみ(-)	$_d\varepsilon_0$	0.0015
初期応力(N/mm²)	$_d\sigma_0$	4.82
終局応力(N/mm²)	$_d\sigma_u$	30.55
圧縮強度(N/mm²)	$_d\sigma_c$	32.16
引張強度(N/mm²)	$_d\sigma_t$	0.32
引張破壊 エネルギー(N/mm)	$_dG_f$	$\frac{0.23_d\sigma_t+136}{1000}$

表 3. 3. 3-5 損傷程度「小」の
コンクリートの材料特性

密度(t/mm³)	ρ	2.40×10^{-9}
ポアソン比(-)	ν	0.2
ヤング係数 (×10⁴N/mm²)	$_dE$	0.82
初期ひずみ(-)	$_d\varepsilon_0$	0.0037
初期応力(N/mm²)	$_d\sigma_0$	4.82
終局応力(N/mm²)	$_d\sigma_u$	30.55
圧縮強度(N/mm²)	$_d\sigma_c$	32.16
引張強度(N/mm²)	$_d\sigma_t$	0.32
引張破壊 エネルギー(N/mm)	$_dG_f$	$\frac{0.23_d\sigma_t+136}{1000}$

表 3. 3. 3-6　損傷程度「中」、「大」のコンクリートの材料特性

密度(t/mm³)	ρ	2.40×10^{-9}
ポアソン比(-)	ν	0.2
ヤング係数 (×10⁴N/mm²)	$_dE$	0.82
初期ひずみ(-)	$_d\varepsilon_0$	0.0079
初期応力(N/mm²)	$_d\sigma_0$	4.82
終局応力(N/mm²)	$_d\sigma_u$	30.55
圧縮強度(N/mm²)	$_d\sigma_c$	32.16
引張強度(N/mm²)	$_d\sigma_t$	0.32
引張破壊 エネルギー(N/mm)	$_dG_f$	$\frac{0.23_d\sigma_t+136}{1000}$

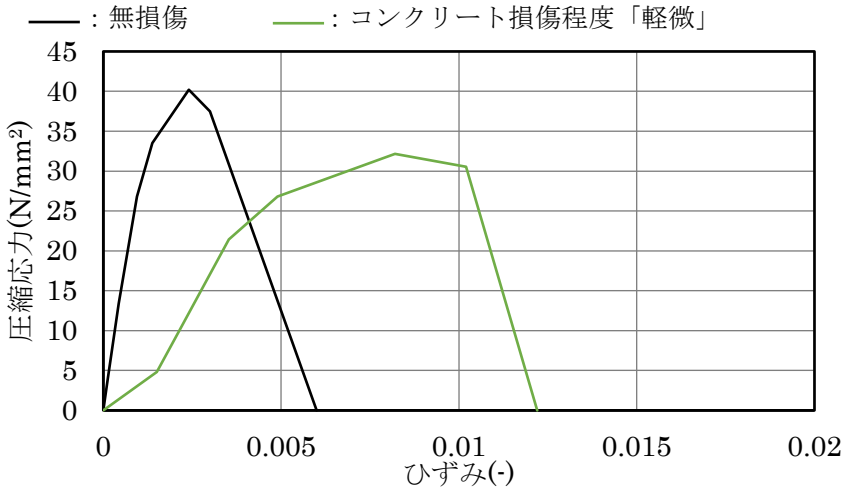


図 3. 3. 3-8　コンクリート損傷程度「軽微」の圧縮側構成則

表 3. 3. 3-7　損傷程度「軽微」での各点のひずみ、応力値

	ひずみ	応力
0	0	0
1	0.0015	4.82
2	0.0022	10.72
3	0.0035	21.44
4	0.0049	26.80
5	0.0082	32.16
6	0.010	30.55
7	0.012	0

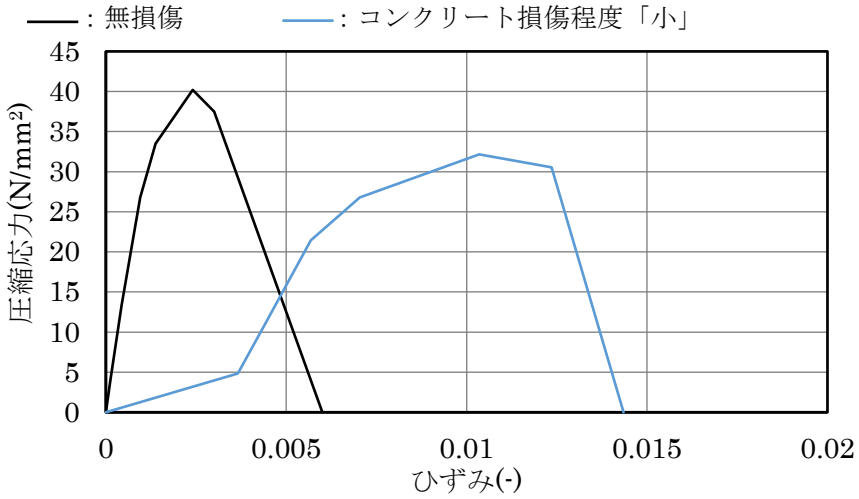


図 3. 3. 3-9　コンクリート損傷程度「小」の圧縮側構成則

表 3. 3. 3-8　損傷程度「小」での各点のひずみ、応力値

	ひずみ	応力
0	0	0
1	0.0037	4.82
2	0.0045	10.72
3	0.0058	21.44
4	0.0071	26.80
5	0.010	32.16
6	0.012	30.55
7	0.014	0

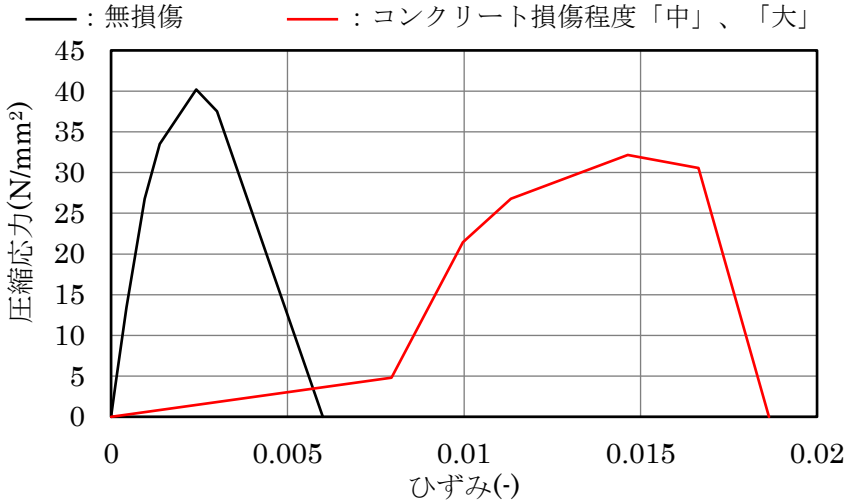


図 3. 3. 3-10　コンクリート損傷程度「中」、「大」の圧縮側構成則

表 3. 3. 3-9 損傷程度「中」、「大」での各点のひずみ、応力値

	ひずみ	応力
0	0	0
1	0.0079	4.82
2	0.0087	10.72
3	0.010	21.44
4	0.011	26.80
5	0.015	32.16
6	0.017	30.55
7	0.019	0

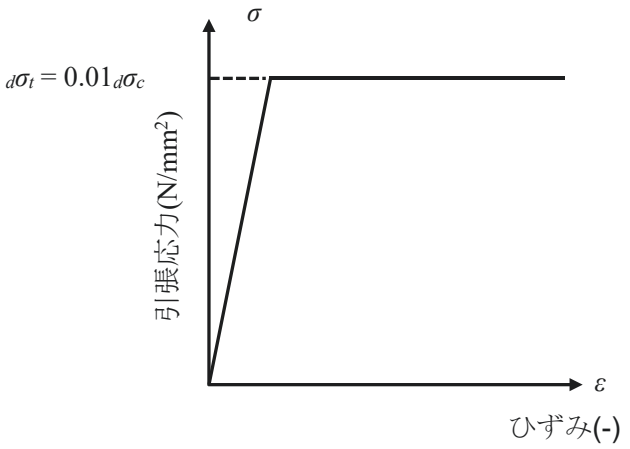
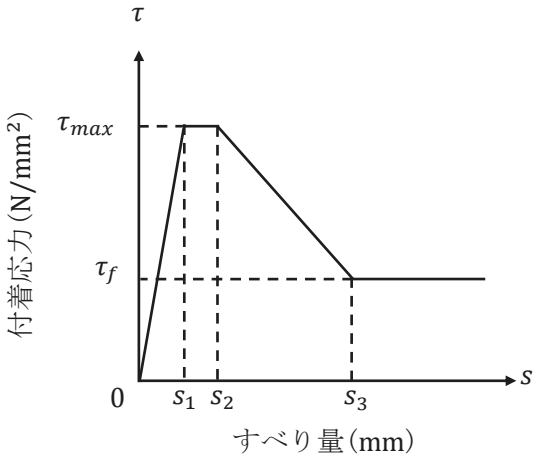


図 3.3.3-11　損傷を有するコンクリートの引張側構成則



$$s_1 = 1.0,\quad s_2 = 2.0,\quad s_3 = 4.4,\quad \tau_{max} = 2.5\sqrt{{}_d\sigma_c},\quad \tau_f = 0.4\tau_{max}$$

図 3.3.3-12　コンクリートー壁筋間の付着応力ーすべり量関係

(5) 材料劣化を考慮したRC造耐震壁のFEM解析結果

ここでは、損傷程度4パターンと損傷箇所7パターンを組み合わせた28パターンに、無損傷モデルを加えた計29パターンのRC造耐震壁のFEMモデルの解析結果について比較検討する。

① 荷重－変形関係及び破壊性状

図3.3.3-13に各モデルの層せん断力－層間変形角関係を示す。解析結果は急激な耐力低下を示す直前のステップまでの結果を示している。

予めひび割れがあることを想定した有損傷モデルの結果は、無損傷モデルの結果と比較して、ほぼすべてのパターンで最大耐力及び初期剛性がともに低下した。また、損傷箇所が同じであっても損傷程度の大きさに従って性能の低下幅が顕著となることを確認した。具体的には、壁面全面又は上半分に損傷を有するモデルでは、損傷程度「軽微」、「小」の最大耐力はおよそ1,800 kNに達し、損傷のないモデルとほぼ変わらない値を示したが、コンクリートの損傷を大きく設定した「中」、「大」では最大耐力が大きく低下した。なお、同2種のモデルの最大荷重時の変形角については、損傷程度「大」を除き、大きくなる傾向が見られた。応力抵抗に寄与する多くの要素の材料構成則で設定した初期ひずみ $_d\varepsilon_0$ が影響しているものと考えられる。右半分、圧縮ストラット、中央部、隅角部及び全面半分に損傷を有するモデルについては、損傷程度の大きさに従って、耐力、剛性ともに低下した。上記2種で見られた変形性能の向上は見られなかった。

図3.3.3-14に、損傷箇所が異なる場合の破壊モードの比較のため、損傷程度「小」モデルの最大耐力時における最大主ひずみ分布を示す。壁面の中央、全面半分に損傷を有するモデルは損傷箇所がそれぞれ異なるが、最大耐力時に発生する最大主ひずみ分布は損傷のないモデルと概ね同様の分布と破壊モードであった。壁面の圧縮ストラット方向に損傷を有するモデルでは先ほどの2つのモデルと同じく、損傷を有するモデルと同様の分布と破壊モードであったが、その他に柱にも沿って最大主ひずみが生じていた。また、壁面の隅角部に損傷を有するモデルは図中に主要なせん断抵抗を矢印で示しており、損傷のないモデルと少し最大主ひずみの分布が異なるものの、大きな違いはないことが分かった。これらに対し、壁面の上半分に損傷を有するモデルはひび割れを仮定した壁面の上半分に最大主ひずみが集中し、壁面の右半分に損傷を有するモデルは壁面の下端に最大主ひずみが集中しており、どちらのモデルにおいても損傷のないモデルとは異なるひずみ分布であった。また、壁面の全面に損傷を有するモデルでは、最大主ひずみは損傷のないモデルと同じように、柱頭から多端の柱脚に向かって集中しているものの、その他の壁面の部分においても高い値でひずみが発生していた。

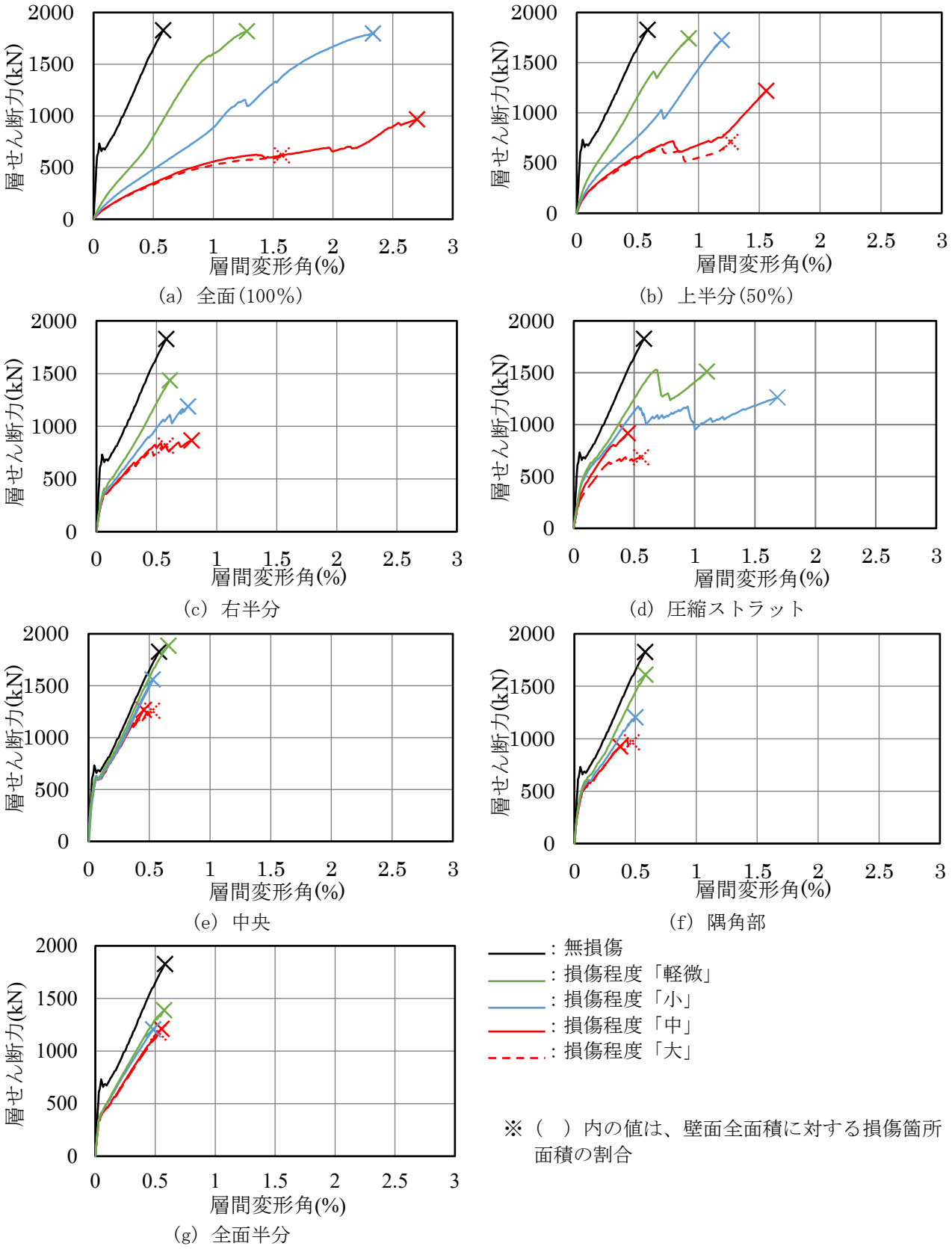
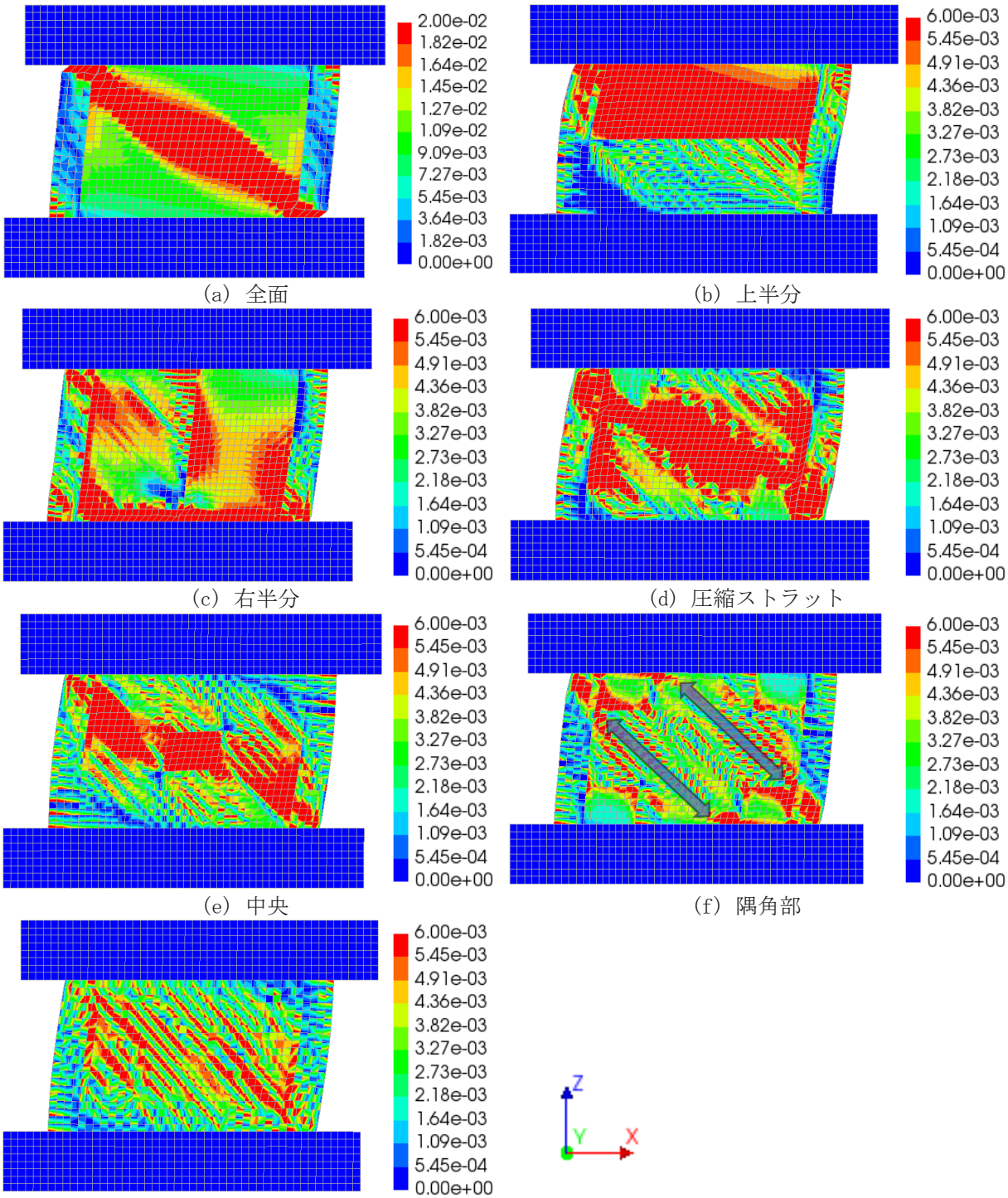


図 3. 3. 3-13　層せん断力－層間変形角関係



(a) 全面

(b) 上半分

(c) 右半分

(d) 圧縮ストラット

(e) 中央

(f) 隅角部

(g) 全面半分

図 3.3.3-14　損傷程度「小」モデルの最大耐力時における最大主ひずみ分布

② 性能評価マトリクスの作成

ここでは、壁面の損傷程度及び損傷箇所に応じて、残存性能を簡易に評価できる性能評価マトリクスを作成する。対象構造物である原子力建屋の RC 耐震壁のようなせん断破壊型の部材は、耐力と剛性（荷重変形における勾配）の評価が重要であると考えられる。よって、耐力、初期剛性及び図 3.3.3-15 に示すような最大耐力までの割線剛性（以下、2 次剛性という。）の 3 種について、性能評価マトリクスを作成する。

表 3.3.3-10～表 3.3.3-12 に耐力、初期剛性及び 2 次剛性の残存性能マトリクスを示す。表中の各値は、無損傷モデルの結果に対する比として表している。壁面全面積に対する損傷箇所面積の割合が大きくなるほど、残存耐力、残存初期剛性はともに小さくなっていくことが分かる。また、壁面の全面半分に損傷を有するモデルは壁面全面積に対する損傷面積の割合が 50%であるものの、図 3.3.3-14(g)に示したように、壁面の中央、隅角部、圧縮ストラット方向に損傷を有するモデルと同じく、柱頭から他端の柱脚に向かって最大主ひずみが発生し、損傷のないモデルと同じ分布であった。そのため同じ損傷箇所面積の割合を有するモデルよりも残存耐力、残存初期剛性はともに高い値となった。反対に壁面全面積に対する損傷面積の割合が 50%である、壁面の上半分、右半分に損傷を有するモデルはどちらも損傷のないモデルとは異なるひずみ分布であったため、構造性能がその他の損傷を有するモデルよりも大きく低下したと考えられる。

以上より、本検討で得た性能評価マトリクスを用いることで、損傷検知情報として、壁面におけるコンクリートの損傷箇所と損傷程度及び壁筋の付着劣化を得ることができれば、壁面の残存性能を簡易に評価することができると考えられる。

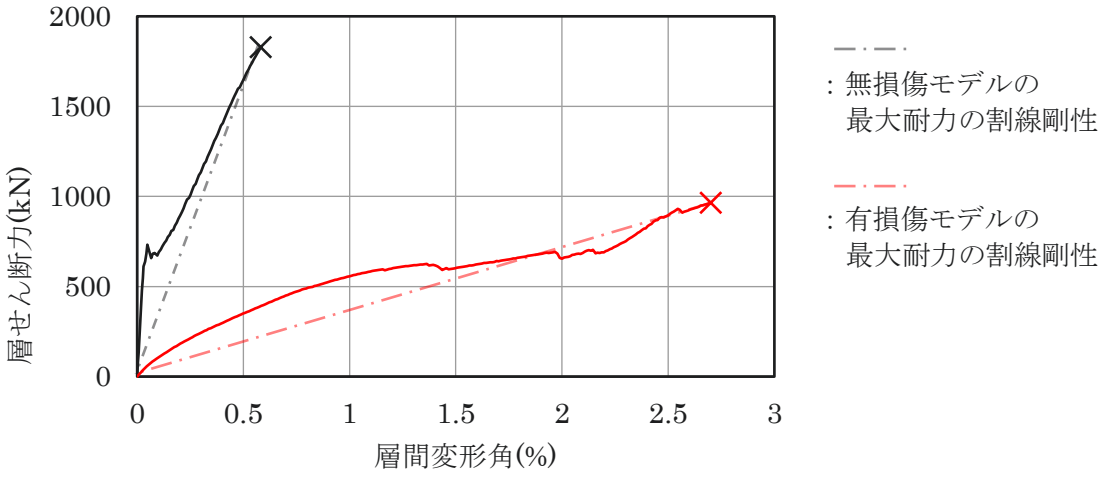


図 3.3.3-15　最大耐力までの割線剛性（2 次剛性）について

表 3.3.3-10　残存耐力マトリクス

		損傷程度			
		「軽微」	「小」	「中」	「大」
損傷箇所	中央損傷(6.25%)	1.00	0.85	0.70	0.69
	隅角部損傷 (25%)	0.89	0.66	0.51	0.53
	全面半分損傷(50%)	0.76	0.66	0.66	0.63
	圧縮ストラット損傷(34.4%)	0.82	0.69	0.50	0.37
	右半分損傷(50%)	0.79	0.65	0.47	0.44
	上半分損傷(50%)	0.96	0.94	0.67	0.35
	全面損傷(100%)	0.99	0.98	0.52	0.33

表 3.3.3-11　残存剛性マトリクス（初期剛性）

		損傷程度			
		「軽微」	「小」	「中」	「大」
損傷箇所	中央損傷(6.25%)	0.85	0.84	0.83	0.83
	全面半分損傷(50%)	0.62	0.60	0.60	0.60
	隅角部損傷 (25%)	0.65	0.61	0.59	0.59
	圧縮ストラット損傷(34.4%)	0.48	0.45	0.41	0.40
	右半分損傷(50%)	0.44	0.40	0.39	0.38
	上半分損傷(50%)	0.28	0.20	0.17	0.17
	全面損傷(100%)	0.14	0.089	0.065	0.065

表 3.3.3-12　残存剛性マトリクス（2 次剛性）

		損傷程度			
		「軽微」	「小」	「中」	「大」
損傷箇所	中央損傷(6.25%)	0.91	0.94	0.88	0.76
	全面半分損傷(50%)	0.77	0.80	0.70	0.70
	隅角部損傷 (25%)	0.87	0.76	0.78	0.65
	圧縮ストラット損傷(34.4%)	0.44	0.24	0.65	0.39
	右半分損傷(50%)	0.74	0.50	0.35	0.47
	上半分損傷(50%)	0.60	0.46	0.25	0.18
	全面損傷(100%)	0.45	0.24	0.11	0.12

※　まとめ

(1) コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価

・ 急速凍結融解試験によって段階的に力学性能を低下させたコンクリート試験体に対して、周波数を連続的に変化させてサブテラヘルツ波イメージング技術による測定を行い、導入した劣化状態（力学特性）との関係を得た。

・ 20～50 GHz の範囲で周波数を変化させたスペクトル測定により得られた結果から、測定に適した周波数を選択して測定方法のキャリブレーションを行うことで、圧縮強度やヤング係数などの力学特性の低下を推定できることが確認された。

・ より高度なキャリブレーションを行うためには、劣化の程度や使用材料、適用する周波数などパラメータを拡充する必要があると考えられる。

(2) 鉄筋腐食と付着不良・剥離等に基づく材料特性の評価

・ サブテラヘルツ光学系測定装置の距離における適用範囲は、赤外線サーモグラフィーのような長距離による測定性能と電磁波レーダの測定性能を併せ持つ測定系であると考えられ、内部劣化をコンクリート表面と並行に発生したひび割れの検知と限定した時、本研究で用いたサブテラヘルツ波光学系測定装置は測定距離 240 cm 程度まで測定でき、幅広い適用が可能と推測される。

・ サブテラヘルツ光学系測定装置の測定角度の適用範囲は、内部劣化と含水率測定ともに、測定角度によって鉄筋の影響を示唆し、測定角度 90±5° 以内に抑えることで鉄筋の影響を除外して評価できる可能性を示した。本研究の目標は測定対象から十分に離れた距離から測定することを目標としているため、測定角度を 90±5° でも十分な適用範囲であることを示した。

(3) 材料劣化特性に基づく部材の耐震性能評価

・ 損傷した RC 耐震壁（有損傷モデル）の性能劣化を評価するため、凍結融解サイクルを与えた後の圧縮強度試験結果を通じて、コンクリート単体の損傷程度と力学特性の低下の関係について整理した。

・ コンクリートの損傷程度と力学特性低下の関係を整理した情報を基に、損傷程度に応じた 3 段階のコンクリート圧縮側構成則を構築した。また、これに加えて、塩害や中性化などの外乱による経時変化を想定した壁筋とコンクリートの付着劣化を考慮することで、壁面の損傷程度「軽微」、「小」、「中」、「大」の 4 パターンを設定した。

・ 損傷程度 4 パターン及び損傷箇所 7 パターンによる 28 パターンの有損傷モデルに無損傷モデルを加えた計 29 パターンの RC 耐震壁について、FEM 解析を通して荷重変形関係と破壊性状を比較検討した。

・ 各有損傷モデルについて、無損傷モデルに対する耐力、初期剛性及び 2 次剛性の残存性能を整理し、損傷を有する耐震壁の性能評価マトリクスを作成した。当手法により、損傷検知情報に基づく、耐震壁の簡易な性能評価が可能と考えられる。

3.4　総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案【令和 3 年度～令和 5 年度】

(1)　総合的な建屋安全性評価手法の開発

【令和 4 年度までの概要】

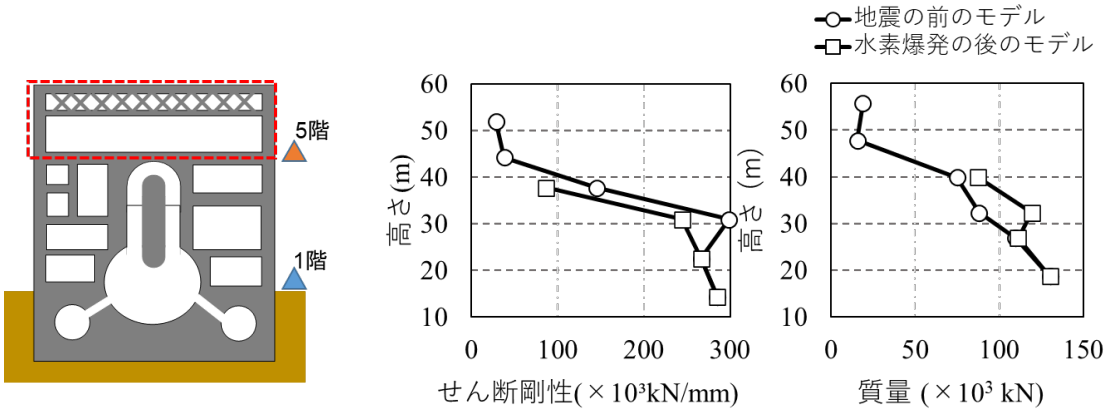
令和 3 年度には、課題①～③でモニタリング、観測、評価を計画している建屋コンクリート構造物に対して、1F 建屋の構造性能健全性を効果的に評価するために、必要な部位・部材や検討すべき項目を抽出し、課題を整理した。建屋モニタリング研究（課題①）に対しては、建屋全体の振動周期や地震応答変形に加えて、変形推定が必要な重要な部位・部材の情報を提供した。電磁波イメージング研究（課題②）に対しては、建屋の構造性能劣化の評価・推定のために、必要なひび割れ損傷の情報を整理して提供した。

令和 4 年度には、複数の観測データに基づく建屋の構造健全性評価の枠組と評価のフローを検討し、一連の流れを設定した。具体的には、ⅰ)加速度応答観測値に基づく各層の加速度、変形の推定、ⅱ)等価 1 自由度系への縮約、ⅲ)応答観測値や損傷イメージを用いた解析モデルの性能曲線の補正、ⅳ)被災度区分の設定と観測値による被災度（構造健全性）の判定、ⅴ)将来の地震による応答する推定と構造健全性予測、とした。

【令和 5 年度実施内容及び成果】

課題①～③で開発した評価手法を 1F の原子炉建屋に適用した。

原子炉建屋の立面図を図 3.4-1(a)に、各層のせん断剛性と質量の分布を図 3.4-1(b)、(c)に示す。



(a)立面図　　(b)せん断剛性　　(c)質量の分布

図 3.4-1　原子炉建屋の構造特性

原子炉建屋の 1 階と 5 階に設置された加速度計より、表 3.4-1 に示す小地震及び中地震時の加速度記録が観測されている。図 3.4-2 に令和 3 年 3 月 20 日の地震より得られた加速度記録と加速度の二重積分により求めた変位を併せて示す。また、これらの加速度、変位の値を使用して応答スペクトル法の逆算により求めた、観測記録の等価粘性減衰定数の値を図 3.4-3 に示す。

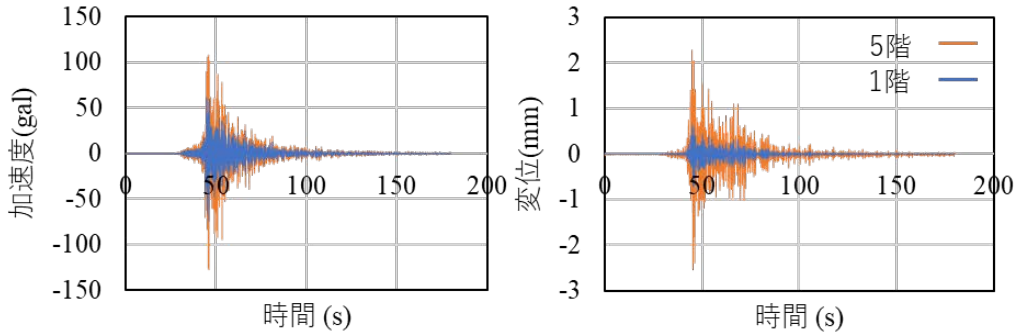


図 3.4-2　地震観測記録－加速度と応答変位（令和 3 年 3 月）

表 3.4-1　地震観測記録

CASE	DATE
1	20.04.08
2	20.04.12
3	20.04.16
4	20.04.20
5	20.04.28
6	20.05.19
7	20.06.01
8	20.07.03
9	21.03.20

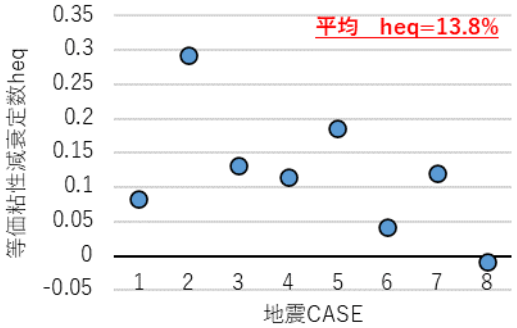
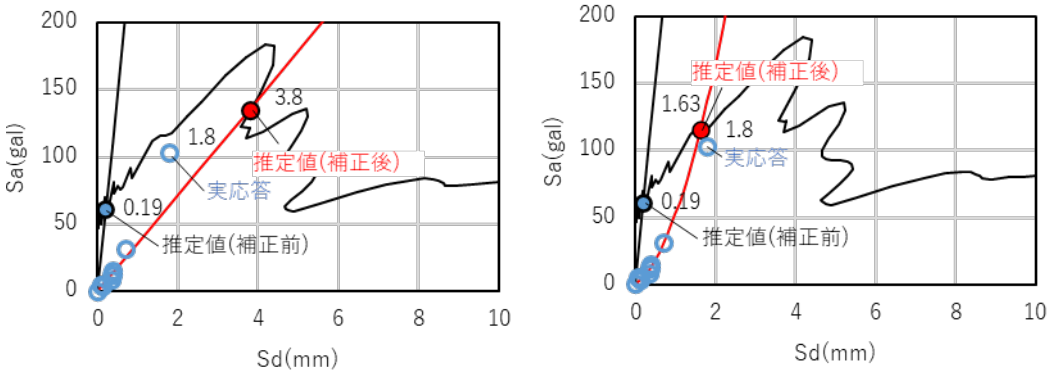


図 3.4-3　観測記録の等価粘性減衰定数

以上のようにして得られた表 3.4-1 の令和 2 年 7 月までの 8 回の地震の観測記録を使用して、課題①において述べた方法により、解析モデルの性能曲線や等価粘性減衰定数の補正を行い、令和 3 年 3 月の地震の応答予測を行った。得られている観測記録は極めて小さいため、本検討では(a)係数倍法、(b)2 次曲線フィッティング法により検討を行った。それぞれの応答予測結果を図 3.4-4 と表 3.4-2 に示す。



(a)係数倍法　　(b)2 次曲線フィッティング法

図 3.4-4　応答予測結果

表 3.4-2　応答予測結果

	Sa(gal)	Sd(mm)s
実応答	103	1.8
推定値(補正前)	63.2	0.19
推定値(係数倍法)	139.7	3.93
推定値(2 次曲線フィッティング法)	115.8	1.63

これらの結果より、補正を行うことで推定精度が向上していることが分かった。また、係数倍法では実応答よりも大きな対象建物については、損傷があることから 2 次曲線フィッティング法を行うことで精度がより良い結果となった。いずれにしても、提案した手法を組み合わせることで、将来の応答の範囲の推定ができる可能性が示された。

(2)　長期保全計画の提案

1F 原子炉建屋は放射性物質による高放射線量率と高汚染で内部への接近性が極端に限定されている。また、事故による損傷を受けており、安全機能（放射性物質の閉じ込め機能）が低下していると考えられる。このような条件下でいかに合理的に保全を実施していくか、その考え方、アプローチの仕方等を検討するのが本項での課題である。ここでは、原子炉建屋の閉じ込め機能を支えている構造保持機能（構造強度）と密閉機能（特に気密性）のうち、構造保持機能を確保するための長期保全計画について検討する。なお、密閉機能については、燃料デブリの本格取り出し前に何らかの方法で一定の気密性が確保されるような措置（図 3.4-5）が取られることを想定して検討を進める。

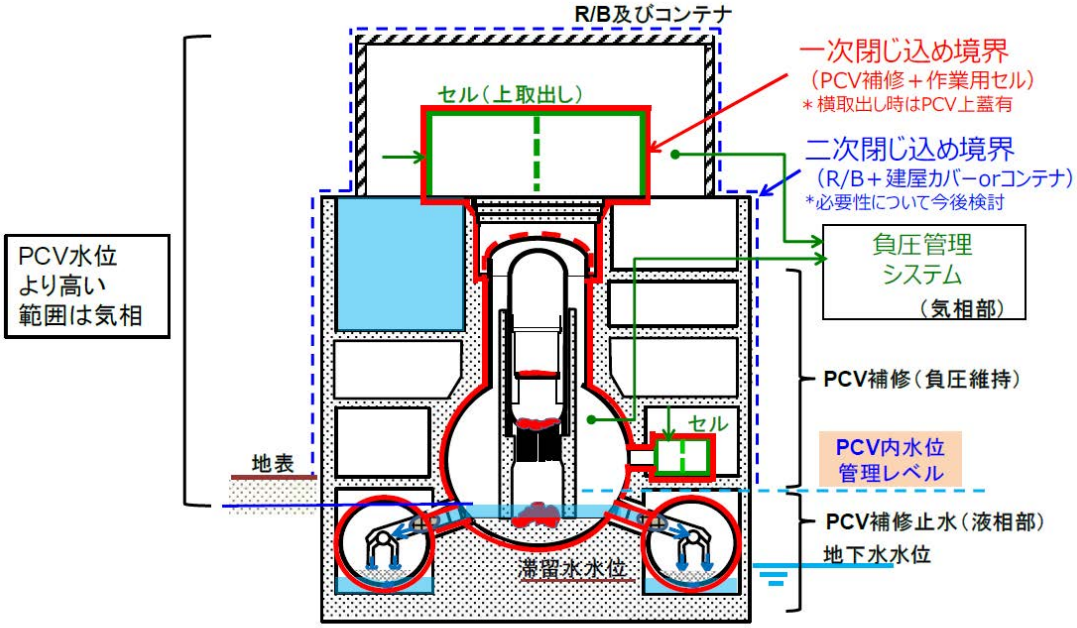


図 3.4-5　負圧管理による閉じ込め機能（気相部）の構築例[3.4-1]

【令和 4 年度までの概要】

令和 3 年度は、事故炉廃止措置の特徴や安全リスクに対する基本戦略、事故炉廃止措置のために必要な設備保全活動について検討し、その基本的考え方を整理した。その上で、接近性が極端に限定された原子炉建屋に対して長期的な観点からどのように設備保全を実施すれば良いか、すなわち、どのような長期保全計画を立案すれば良いか、その考え方について検討した。

令和 4 年度は、引き続き長期保全計画のイメージを具体化するため、本研究の中における長期保全計画の位置付けを明確にするとともに、長期保全計画を構成する 3 要素（保全対象箇所、保全方法、保全実施時期）を具体化するための考え方等について検討を行った。

【令和 5 年度実施内容及び成果】

最終年度である令和 5 年度は、これまでの長期保全計画に関する考え方を最終化するとともに、その結果に基づき事故炉原子炉建屋に対する具体的な長期保全計画の 1 例を提案した。以下に、その概要を述べる。

① 本研究の中における長期保全計画の位置付け検討

長期保全計画のイメージを明確にするため、本研究全体の中における長期保全計画の位置付けを明確にすることが重要と考え、検討した。検討結果を図 3.4-6 に示す。

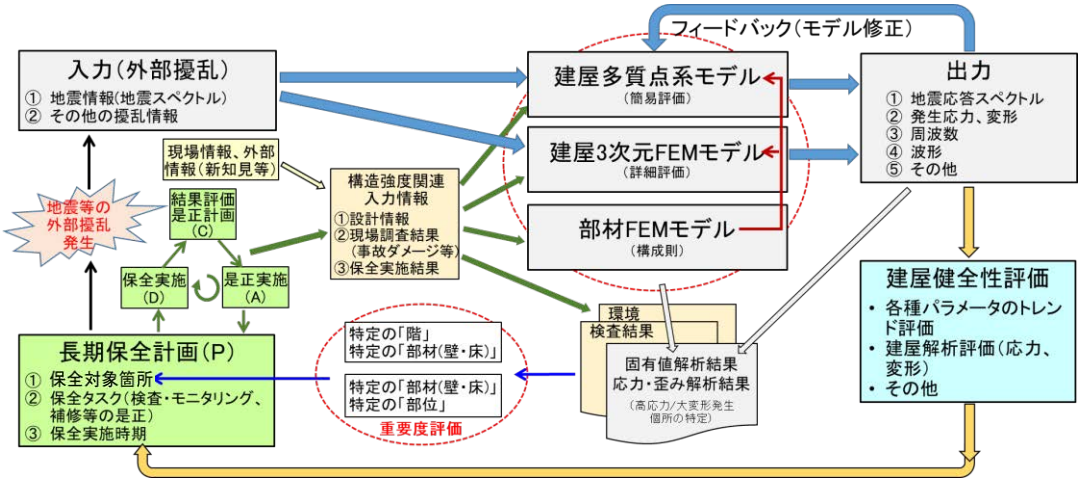


図 3.4-6　本研究の中における長期保全計画の位置付け

研究課題①で建屋の多質点系モデルと 3 次元 FEM モデルを構築している。これらのモデルは設計情報やこれまでの現場調査の結果、そして今後長期保全計画の一部である検査・モニタリングで新しい情報・データが得られる都度、それらが反映されて構築され、精緻化される。これらのモデルに地震等の外部擾乱を入力すれば、建屋の応答を出力として得ることができ、その出力は建屋の健全性評価のために使用される。また、研究課題③では、RC 部材のひび割れや鉄筋腐食等の劣化が部材（壁・床）強度にどのような影響を与えるかを定量評価できる部材モデルを構築している。このモデルは長期保全計画の一部である検査・モニタリングの結果を反映して部材としての構造強度を評価し、その結果は前述の多質点系モデルと 3 次元 FEM モデルに反映される。

長期保全計画は、保全対象箇所、保全タスク（検査・モニタリングと補修等の是正措置)、保全実施時期の 3 つの要素からなり、この計画に基づいて（Plan)、保全タスクが実施され(Do)、その結果が評価されて必要に応じて是正計画が立案され(Check)、そして是正が実行される(Act)。いわゆる保全サイクル PDCA が実施され、継続される。この PDCA で得られた情報は解析モデルや後述する建屋の部材・部位の重要度評価に用いられる。

研究課題①の加速度センサ及びジャイロセンサを用いた地震時における建屋応答計測システムは、長期保全計画の中の検査・モニタリング方法の 1 つと考えることができる。また、研究課題②のテラヘルツ波及びサブテラヘルツ波を用いた検査システムも、長期保全計画の中の検査・モニタリング方法の 1 つと位置付けられる。

② 戦略的で効率的・効果的な長期保全計画の検討

事故収束後、1F 原子炉建屋の健全性が確認されたとは言え、長期を要する廃止措置の全期間に亘ってその健全性をどう確認しながら使用していくか検討し、その結果に基づき当該建屋を使用していくことが重要である。また、燃料デブリの本格取り出しを開始する前に原子炉建屋の安全機能（構造強度＋気密性）を確保し、その上でその機能を長期的に確保できる見通しを得ておくことが重要である。しかしながら、事故炉廃止措置の環境条件は、高放射線量率及び高汚染のため接近が困難であるだけでなく、事故による損傷や瓦礫等によりスペースが狭隘で作業性が悪く、また危険でもある。このような条件下で原子炉建屋の保全を行おうとする場合、高度な遠隔操作技術や放射線計測・分析技術などが必要となり、それら技術を駆使した現場作業には多くの作業員と時間、資機材が必要となることが考えられる。また、現場作業をステップ・バイ・ステップで進めても、想定外の事象の発生により、その度に技術開発や諸準備をやり直す必要が生じる可能性がある。このようなプロジェクトを有限なリソース（保全に関わるヒト、モノ、カネ、情報、時間など）の下で完遂しようとする場合、戦略的で効果的・効率的な考え方と具体的な方法が必要となる。

1）長期保全計画のイメージ検討

長期保全計画は、保全対象箇所、保全タスク、保全実施時期の 3 要素からなる。その長期保全計画のイメージ、在るべき姿について以下に検討した。

通常の保全活動では、経年劣化の観点から多数の設備・機器をグループ分けし、そのグループの中で最も厳しい設備・機器あるいは代表性のある設備・機器を選定し、その設備・機器に対して適切な保全タスク（検査・モニタリング及び補修等の是正措置）を実施する方法を採用する。原子炉建屋のような大型構造物では、経年劣化の観点から条件が厳しいと考えられる箇所を抽出し、その抽出箇所に対して必要な保全タスクを実施するということになる。しかしながら、事故炉では保全対象への接近性が極端に制限されているため、保全対象の健全性を適切に把握するという目的を達成できる範囲内で、できるだけ保全対象箇所を絞り込むという戦略的アプローチが必要となる。保全対象箇所を絞り込めば、その分、保全活動（保全実施体制/要員数×所要時間、必要資機材など）を削減できるので、大変重要な検討である。

絞り込まれた保全対象箇所に対して実施する保全タスクは、これも保全対象の健全性を適切に把握するという目的を達成できる範囲内で、できるだけ少ないリソースで実施できる効果的・効率的な方法（検査・モニタリング方法及び補修等の是正措置方

法）を採用することが重要である。通常は適用できる既存の方法の中から最適な方法を選定するが、そのような方法が十分ない場合には技術開発を行う必要がある。この場合も技術開発コストを含めたコスト・ベネフィット分析を実施した上でリソースの消耗の少ない方法を採用することが重要である。

保全実施時期は、通常、経年劣化の進展を予測し、ある程度の劣化が進んだと予測される時点でそれを確認するために検査を実施する、そのような次回検査の時期として決定される。また、同様に機能喪失が予測される前に補修等の是正を実施する必要があるので、そのような時期として是正実施時期が決定される。したがって、予測よりも劣化が進行しているようなことがないように保守的に経年劣化の進展速度を設定する必要があるが、その一方で過度に保守性を確保すると、次回の検査時期や是正時期を過度に早めることとなり、必要以上のリソースを消耗させることとなる。このようなことが発生しないように適切に経年劣化の進展速度やそれに基づく保全実施時期を決定する必要がある。

以上をまとめて、原子炉建屋のための長期保全計画のイメージを図 3.4-7 に示す。この図中の「戦略的アプローチ」と「効果的・効率的な方法」については次項以降で詳細検討する。

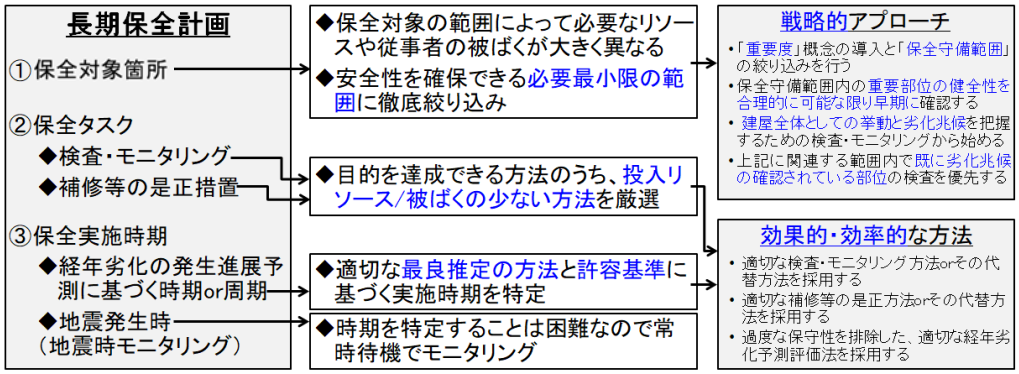


図 3.4-7　長期保全計画のイメージ

2）長期保全計画 3 要素の検討

本項では、研究課題①-1 の建屋全体の挙動をモニターして解析で建屋健全性を推定評価する方法（建屋レベルの健全性評価）、研究課題①-2 の壁・床の挙動をモニターして推定評価することによりその結果を建屋全体の健全性評価のために提供する方法（部材レベルの健全性評価）、研究課題②のコンクリート内部の状態を検査してその結果を建屋全体の健全性評価のために提供する方法（部位レベルの健全性評価）、それら 3 つの方法を総合し、組み合わせて原子炉建屋の健全性を評価する方法を確立するといった捉え方をしている（図 3.4-8）。この考え方に基づき、長期保全計画の 3 要素（保全対象箇所、保全タスク、保全実施時期）について、以下に検討する。

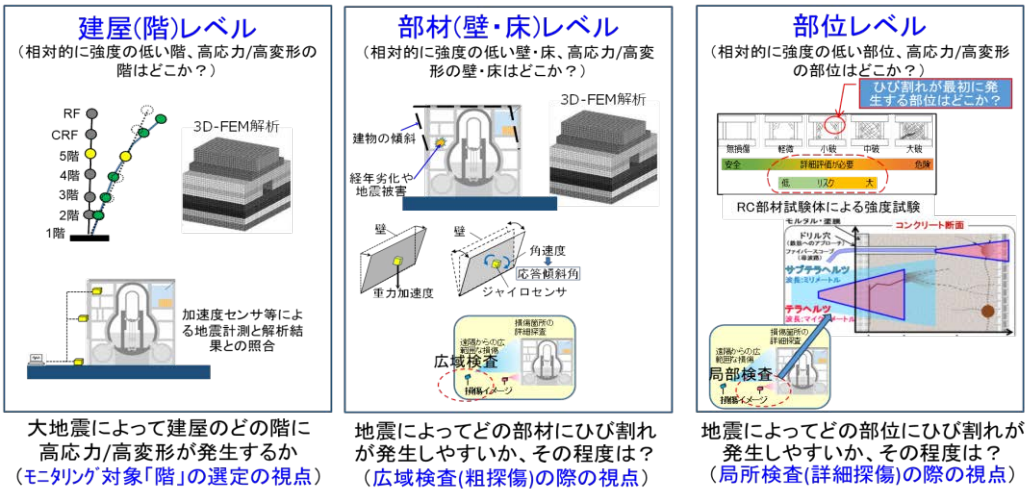


図 3.4-8　建屋の着目すべき箇所と検査・モニタリング方法

(a) 保全対象箇所に関する検討

リソースを無駄遣いせず効果的・効率的に活用するには、保全対象箇所をできるだけ絞り込む方法を検討する必要がある。ここでは、保全対象箇所を絞り込むための戦略的アプローチとして、以下の 2 つの方法を検討した。

・「重要度」概念の導入
・「保全守備範囲」の絞り込み

原子炉建屋の経年劣化の観点から条件の厳しい箇所を特定する方法として「重要度」を評価する方法を考えた。これは解析によって高応力高変形箇所の特定により構造強度余裕を評価し、それに環境影響を加味して重要度を評価する方法である（図 3.4-9）。これは、RC が金属材料の溶接部のような特異箇所がないことから高応力部/高変形部に経年劣化の起点としてひび割れが発生し、その後は環境の厳しい箇所で劣化が進行するとの考えに基づくものである。ここで、RC の経年劣化は図 3.4-10 に示すシナリオで発生・進展することを想定している。また、もう 1 つの戦略的アプローチとして「保全守備範囲」を絞り込むことを考えた。これは、事故プラントに比較的近い類似プラントの現場調査結果等を踏まえ、地下階等の低層階及び PCV シェル周辺壁が地震や事故で損傷

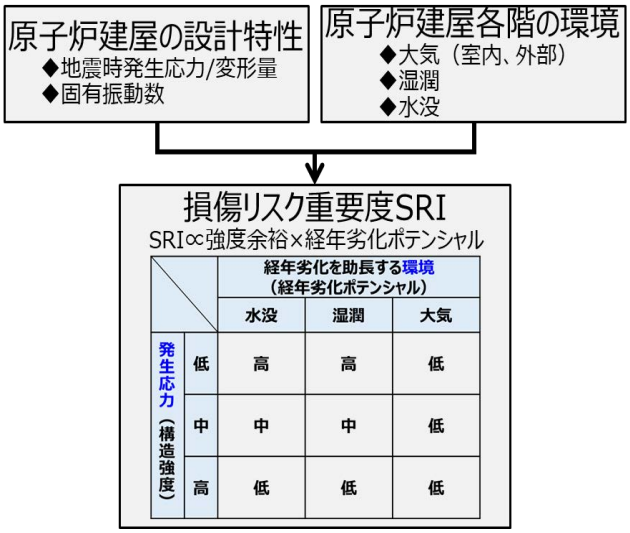


図 3.4-9　「損傷リスク重要度」概念の導入

している可能性は低いと考えられるので（図 3.4-11）、この範囲の健全性を維持することによって建屋全体としての構造強度を確保すること、すなわち建屋の安全機能（閉じ込め機能）に影響を及ぼす大きな崩壊が発生しないことを示せる可能性が高い。したがって、これら損傷している可能性が低い箇所よりはむしろ事故ダメージのある建屋階に保全リソースを重点的に投入することが合理的であると考えられる。

このようにして絞り込んだ範囲を保全の守備範囲と考え、ここに保全リソースを重点投入すれば、効果的・効率的であると考えられる（図 3.4-12）。ただし、この守備範囲の健全性が確保されれば建屋全体としての健全性が確保されることを別途証明する必要がある。一方、当該範囲は健全性が確保されている可能性が高いので、現場検査の優先度を比較的低く設定できると考えられ、検査の準備や環境等の条件が整った時点で代表箇所を検査するという考え方を取ることも可能であると考える。

以上の議論をまとめて図示すると、図 3.4-13 のようになる。

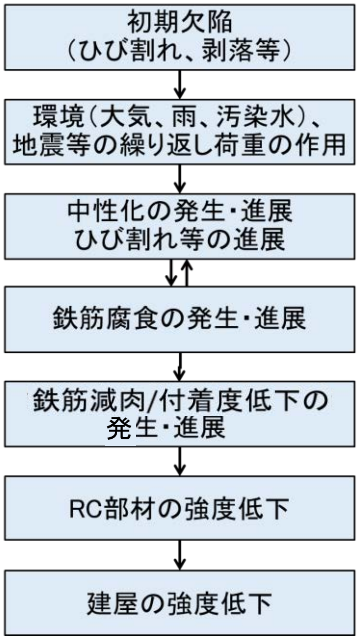


図 3.4-10　RC の劣化シナリオ

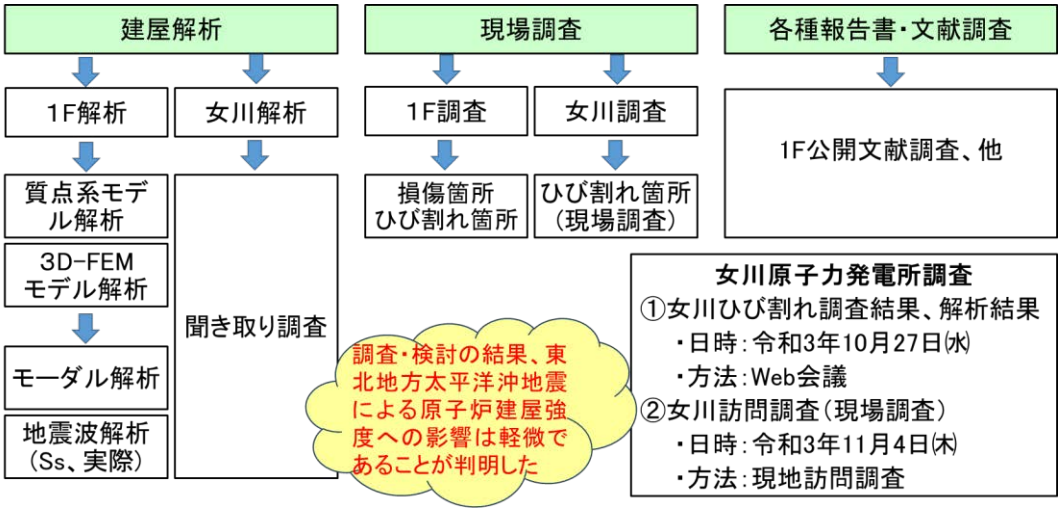


図 3.4-11　大地震を経験した原子炉建屋の調査結果

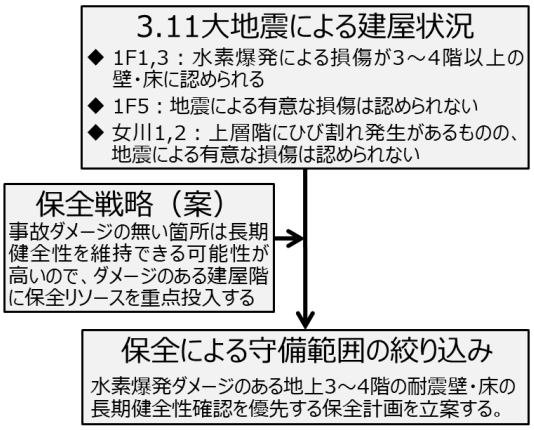


図 3.4-12　「保全守備範囲」の絞り込み

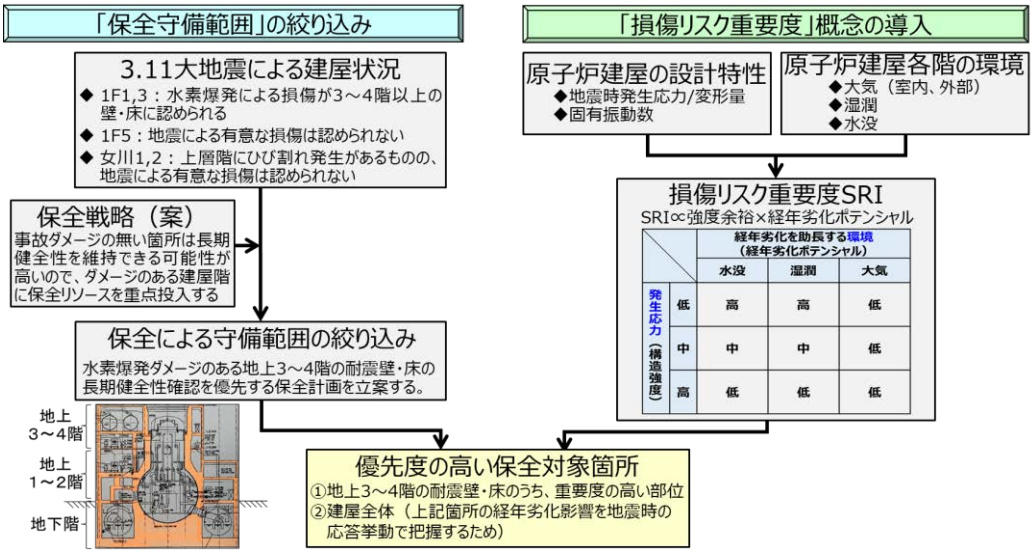


図 3.4-13　「保全守備範囲」の絞り込みと「重要度」概念の導入

(b) 保全タスクに関する検討

リソースを無駄遣いせず、効果的・効率的に保全タスク（検査・モニタリング及び補修等の是正）を実施するには、検査・モニタリング及び補修等の是正の目的が達成できることを前提に、建屋へ接近する必要性の少ない効果的・効率的技術を採用する必要がある。

● 検査・モニタリング

1 つの技術で建屋健全性を把握するのは困難であるため、図 3.4-8 に示したように、建屋全体、階、部材、部位の各レベルで劣化兆候を検知できる技術を探索し、それら技術で得られる情報を組み合わせ、総合的に評価することを念頭に、検査・モニタリングを計画する必要がある。

現時点で現実的に実施可能と考えられる検査・モニタリング方法は下記の通りである。

- 建屋（階）レベルの検査・モニタリング方法
  加速度センサによる地震時建屋応答モニタリング（図 3.4-14）
- 部材レベルの検査・モニタリング方法
  - 加速度センサによる長期変形モニタリング及びジャイロセンサによる地震時応答モニタリング（研究課題①で開発）（図 3.4-15）
  - サブテラヘルツ波による広域検査（研究課題②で開発）（図 3.4-16）
  - 従来からの目視による表面検査
- 部位レベルの検査・モニタリング方法
  - サブテラヘルツ波による局部検査[1]（研究課題②で開発）（図 3.4-16）
  - 従来からのコアサンプル採取など

ここで、加速度センサによる地震時建屋応答モニタリングは、図 3.4-14 に示すように、原子炉建屋全体の地震時応答挙動を把握するために建屋外壁の各階に相当するレベルにセンサを設置することを想定している。外壁であれば、放射線量率や汚染の程度が比較的低いので、設置が比較的容易である。また、運用開始後の保全を容易にするため、センサの着脱・取替を容易にしたり、電源を工夫したりすることが重要である。

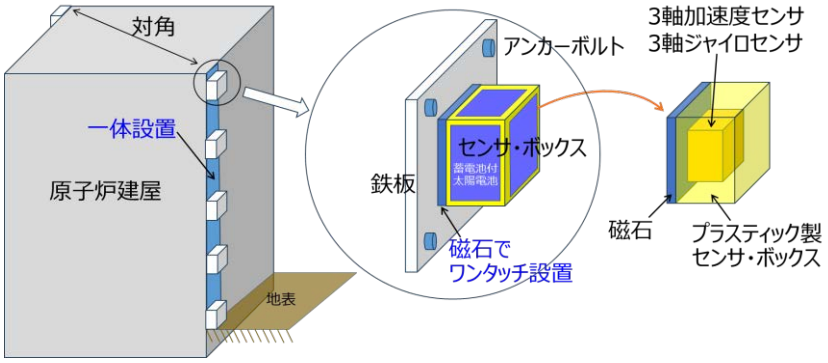


図 3.4-14 加速度センサによる地震時建屋応答モニタリングシステム

加速度センサによる長期変形モニタリング及びジャイロセンサによる地震時応答モニタリングは、図 3.4-15 に示すように、原子炉建屋の部材レベルの健全性を把握するために経年劣化の進展を把握したい耐震壁・床に設置することを想定している。センサの設置場所は水素爆発で事故ダメージのある上層階の耐震壁・床のうち、3.1.2 項に示す方法で最適箇所を決定するか、あるいは経年劣化の進展を直接モニターしたい耐震壁・床に設置することを検討することとなるが、現場の放射線量率や汚染の程度によっては代表的な耐震壁あるいは床に限定・設置し、定点観測することが考えられる。

[1] 本研究でテラヘルツ波による局部検査手法の開発に取り組んだが、これまでの研究ではコンクリート内部の状況を検査することは難しいことが判明した。その一方で、サブテラヘルツ波を用いればコンクリート内部の状況をある程度把握できる可能性があることが判明した（本報告書の 3.2 節参照）。

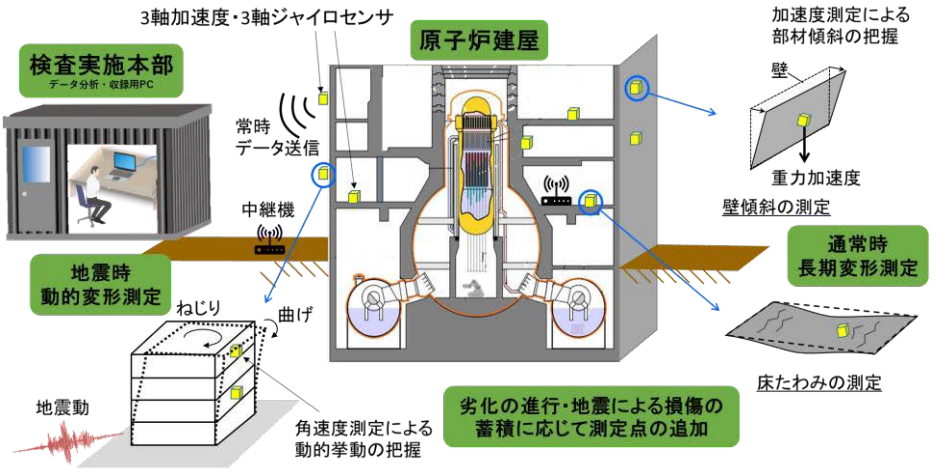


図 3.4-15　加速度/ジャイロセンサによる壁床傾斜計測システム

サブテラヘルツ波による広域検査は、原子炉建屋の部材レベルの健全性を、また、サブテラヘルツ波による局部検査は部材の特定部位の健全性を把握するために経年劣化の進展を把握したい耐震壁・床あるいは耐震壁・床の特定部位を検査することを想定している（図 3.4-16）。検査対象箇所は水素爆発で事故ダメージのある上層階の耐震壁・床のうち、3.1.2 項に示す方法で最適箇所を決定するか、あるいは経年劣化の進展を直接モニターしたい耐震壁・床を検査することを検討することとなるが、現場の放射線量率や汚染の程度によっては代表的な耐震壁あるいは床に限定して定点観測することが考えられる。

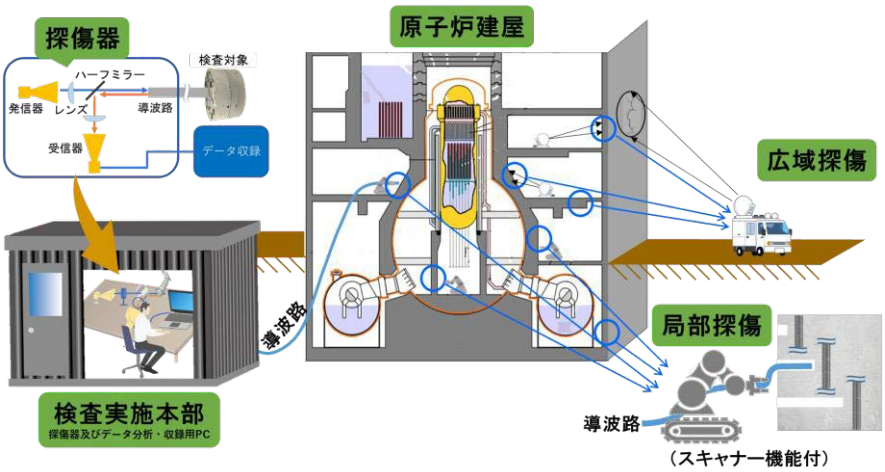


図 3.4-16　テラヘルツ/サブテラヘルツ波による探傷システム

以上述べたこれらの検査・モニタリングで得られるデータや情報は建屋の健全性評価に使用されることになるので（図 3.4-17、図 3.4-18）、極めて重要である。また、検査・モニタリング技術に求められる精度は、建屋の劣化

を評価する上で必要な精度以上のものでなければならないが、過大であることはリソースの消耗につながるので注意が必要である。

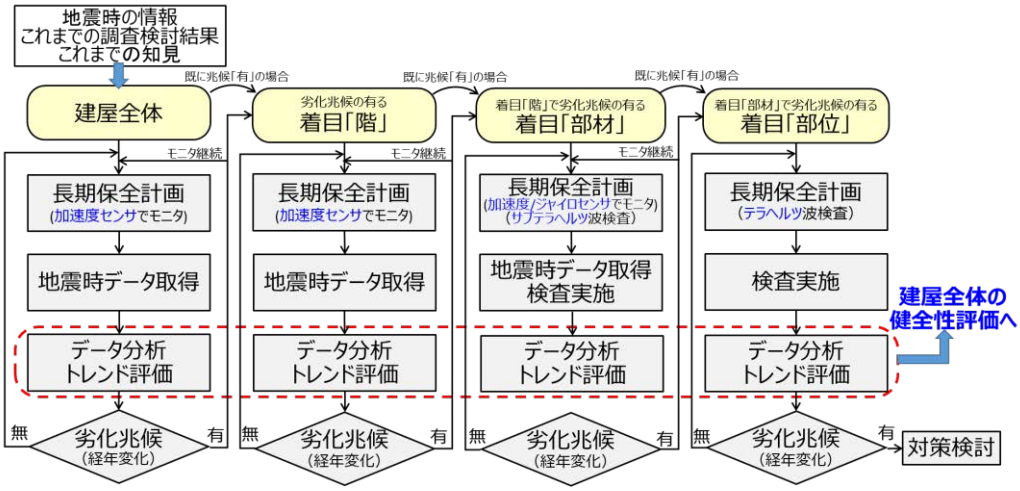


図 3.4-17　検査・モニタリングで得られるデータ・情報と建屋健全性評価の関係

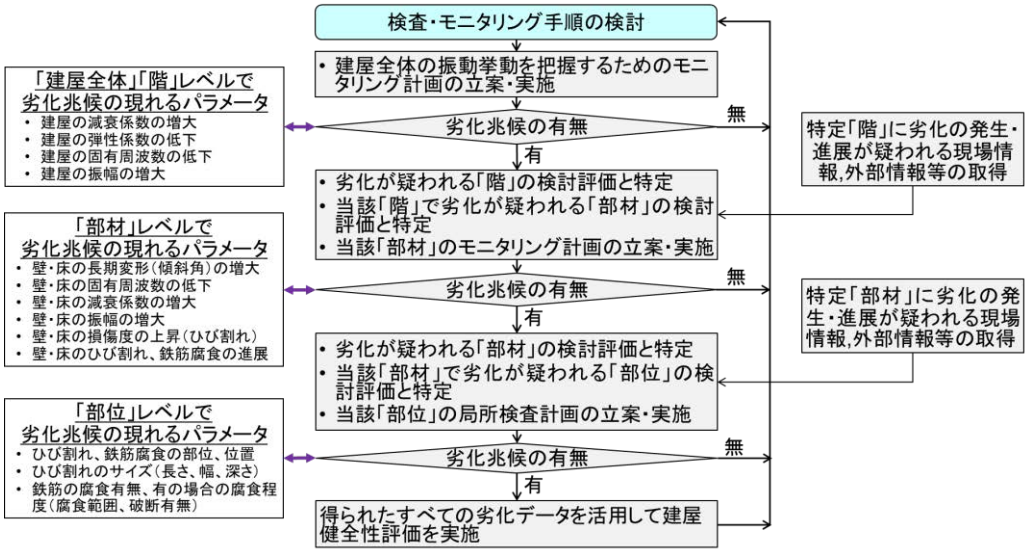


図 3.4-18　検査・モニタリング手順と劣化兆候の現れるパラメータの関係

● 補修等の是正

本研究では是正技術の開発を対象としていないが、検査・モニタリングの結果に基づく健全性評価で将来における建屋構造強度の低下が想定される場合は何らかの是正措置を講じる必要がある。事故炉の原子炉建屋への接近性は極端に制限されているので、建屋へ接近する必要性の少ない効果的・効率的技術、すなわち RC のひび割れのシール補修や環境改善によって劣化の進行を抑制できる技術を開発することが重要である。

(c) 保全実施時期に関する検討

事故炉の原子炉建屋等の建物・構築物の多くは RC 構造物であり、事故炉原子炉建屋等の長期保全計画の立案、特に保全タスク（検査・モニタリング及び補修等の是正）の実施時期の決定にあたっては、事故炉の状況を踏まえた上で、RC の劣化評価の方法について検討・整理し、それを長期保全計画の検討に反映する必要がある。RC は、金属のように経年劣化の進展速度に関するデータが十分でなく、経年劣化の進展を予測するために使用する進展速度が定式化されていない。したがって、これまでの経験を踏まえて適切に検査インターバルを設定し、検査を実施せざるを得ない面がある。このため、RC の劣化に関する専門家との意見交換を行うとともに、RC 構造物の劣化に関する既往研究成果を調査・整理し、これらの結果を参考として事故炉の原子炉建屋等の劣化評価の考え方について検討した。

学内の専門家と令和 5 年 4 月に意見交換を行い、コンクリートの中性化や鉄筋腐食等の欠陥の発生・進展に着目した劣化シナリオの妥当性の確認、亀裂の有無と腐食環境（水の存在）の組み合わせでスクリーニングをする考え方や、土木・建築分野での法律等に基づく構造物の検査の考え方について情報共有と意見を得ることができた。また、学外の専門家とも令和 5 年 5 月に意見交換を行い、事故の影響による部分的な RC の損傷と事故炉の置かれた環境（雨がかり、塩分）との組み合わせで劣化を評価する考え方、参考として端島（軍艦島）の建物群の劣化評価をマルコフ連鎖モデルに基づき実施した例の紹介等、貴重な情報共有と意見を頂戴した。これら専門家との意見交換を踏まえ、経年劣化評価における重要ポイントを次のように抽出した。

◆ 事故炉の原子炉建屋の経年劣化評価における重要ポイント
- ✓ コンクリートの中性化や鉄筋腐食等、欠陥の発生・進展シナリオを明確にする。
- ✓ 構造強度を期待したい範囲を対象に、損傷程度と腐食環境条件の組み合わせで扱いを変える。
- ✓ 事故時に水素爆発で大きく損傷した範囲は、強度を期待しない。
- ✓ 事故炉（1F）の環境で経年劣化が進行するには長期間を要する可能性が高いと考えられる。

ここから、事故炉の原子炉建屋の経年劣化評価の基本的考え方を以下の通り整理した。

◆ 事故炉の原子炉建屋の経年劣化評価の基本的考え方
- ✓ 上記の重要ポイントを踏まえ、経年劣化が有意となる長期の使用を想定し、検査・モニタリング結果に基づく健全性評価を行って、その時点における当該部の健全性及び長期健全性を確認する。
- ✓ 上記評価に関する情報を次回検査・モニタリング時期の検討及び総合的な建屋健全性評価へインプットする。

RC 構造物の劣化に関する既往研究成果の調査・整理については、以下に示す通りである。

a）環境条件に関する既往調査

立地場所の環境条件に関する既往調査として、昭和 63 年度の建設省土木研究所（土研）による飛来塩分量全国調査報告書を調べたところ、次のような知見が得られた[3.4-2]。

- ✓ 塩分飛来量と RC の塩分含有量には相関があること。
- ✓ 総じて太平洋側は飛来塩分量が比較的少なく、飛来距離も浅いこと。
- ✓ 飛来塩分量が少なければ、鉄筋の腐食限界に至る時間が長くなること。
- ✓ RC への塩分浸透速度は荷重（応力度）に依存すること。

b）コンクリート材料の塩分浸透に関する既往調査

東日本大震災後の平成 28 年に行われた津波被害を受けたコンクリート材料の塩分浸透状況調査報告書によると、次のようなことが示唆された[3.4-3]。

- ✓ ひび割れ部からの塩分浸透と鉄筋腐食が起こり得ること。
- ✓ メンテナンスにより塩分の浸透を遅らせることができる可能性があること。

c）通常炉に対する基準

原子力発電所の原子炉建屋等の建築物に対する維持管理について規定した日本建築学会の指針・解説[3.4-4]を参考に、事故炉の原子炉建屋等におけるコンクリートの状態把握については、次のように考えられる。

- ✓ 事故炉では接近困難性のため、通常炉で規定される局部破壊試験実施は困難。
- ✓ 立地場所の環境測定を実施し、結果に基づき塩分含有量、中性化程度を評価。
- ✓ 現場以外の場所において、通常炉で規定される加速試験による評価は可能。

上述の既往研究成果の調査・整理結果に基づき、事故炉における環境把握の方法として、次のような考え方をまとめた。

◆ 飛来塩分調査

- ✓ 事故炉サイト内の複数箇所を定点観測し、土研による既往調査における近接地点のデータと比較の上、飛来塩分量を評価する。測定方法については、土研法[3.4-2]からの年数経過を考慮し、それ以降の改良について今後、調査確認が必要である。
- ✓ 測定点は事故炉建屋である必要はないが、局地的影響について検討した上で、事故炉建屋を代表できると評価される測定点を選定する。

◆ 塩分含有量の評価

- ✓ 既往調査・研究における飛来塩分量とコンクリート表層部の塩分含有量との相関関係から、事故炉建屋コンクリート表層部の塩分含有量を推定する。なお、飛来量と含有量の相関関係については、別途、調査検討が必要である。
- ✓ 事故炉サイトの代表箇所において、模擬コンクリート材を用いて塩分含有量の調査を行い、上記の推定方法の妥当性を検証する。

事故炉の劣化評価において、既存の数理モデルを適用する可能性について検討した。具体的には、長崎県端島（軍艦島）における我が国初期の RC 製建物群の長

期に亘る劣化予測にマルコフ連鎖モデルが適用された実績[3.4-5]があり、これを発展させて事故炉の原子炉建屋等の劣化評価に適用可能か否かを検討した。

まず、マルコフ連鎖モデルの仮定は、将来の状態が現在の状態のみに依存するというものであるが、これを言い換えれば、離散的モデルでは 2 項間漸化式、連続的モデルでは 1 階微分方程式を以て現象を良く記述できるという意味であり、多くの物理現象が該当している。上述の軍艦島建物群の長期劣化予測への適用例においては、各棟の部材の劣化度を鉄筋腐食の程度により I（軽微）から V（終局）の 5 段階と 0（劣化なし）の合計 6 段階に定義した上で、劣化度が i である部材数割合が遷移確率 Xi で次の劣化度 i＋1 の部材数割合に遷移すると仮定し、すべての劣化度の部材が存在する棟の劣化度割合調査データと、この仮定に基づく t 年後の計算値を同定することにより遷移確率 Xi を求め、これによりすべての部材の将来における劣化度期待値を算出し、棟ごとにその平均値を求めることで、寿命と定義した劣化度 IV に最も早く到達する棟とその時期及び全棟が寿命を迎える時期を予測した[3.4-5]。

この方法は古典的な統計理論である標本統計の立場から、大量の調査データが存在する軍艦島建物群の劣化評価にマルコフ連鎖モデルを適用したものであり、事故炉の場合には接近困難性のため原子炉建屋等の劣化に関する点検データはほとんど得られないことから、標本統計的なアプローチでは劣化評価は難しいと考えられる。事故炉のようにほとんど点検データがない場合にも可能性があると考えられるのは、確率を確信の度合いとして捉え、必ずしも標本を必須としないベイズ統計である。このような考えから、マルコフ連鎖をベイズ統計の立場から発展させたマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC 法）について理論と適用例を調査した[3.4-6]。その結果、MCMC 法は通例、平均的に一定割合で出現する複数の事象の遷移を動的平衡状態として予測し、実測に基づいてベイズ更新して高精度化していくものであり、劣化評価のような速度論への適用性は現時点では見通せなかった。

保全実施時期に関する検討のまとめ

事故炉原子炉建屋等 RC 構造物の長期保全計画の立案、特に保全タスク（検査・モニタリング及び補修等の是正）の実施時期の決定にあたって、RC の劣化評価の方法について検討・整理した。

その結果、RC の欠陥の発生・進展シナリオを明確にすること、事故炉における損傷の程度と腐食環境条件の組み合わせによって扱いを変えること、事故時に大きく損傷を受けた部分には強度を期待しないこと及び事故炉の環境下での経年劣化の進行には長時間を要することが重要ポイントとして挙げられた。

事故炉の経年劣化を数理モデルを用いて予測する方法についても検討したが、現時点では、点検データが非常に少ない事故炉の原子炉建屋等の劣化を適切に予測できる既存の数理モデルの候補を見出すことは困難であることが分かった。

これらのことから、保全タスクの実施時期の決定に際しては、以下の方針で臨むことが適切と考えられる。

・ 経年劣化が有意となる長期の使用を想定し、検査・モニタリング結果に基づく健全性評価を行って、その時点における健全性及び長期健全性を評価する。

・長期健全性の評価においては、できるだけ保守性を排除して、原子炉建屋等の実力を評価できる技術を用いて経年劣化及び破壊評価を実施し、適切な時期を決定する。
・検査・モニタリングのためのセンサ類の設置については、できるだけ早期に実現するよう開発及び実機実装について検討を進める。
・劣化評価の前提となる環境条件の測定についても、できるだけ早期に実施できるよう必要な準備を進める。
・劣化評価に用いる数理モデルの検討を継続しつつ、当初は保守的に頻度を高くして目視、遠隔技術による検査を実施し点検実績を積むことで、次第に合理的かつ分析的な方法へとアプローチしていく。

③ 事故炉原子炉建屋の長期保全計画の提案

前項までの検討を踏まえ、事故炉原子炉建屋に対する具体的な長期保全計画の 1 例について以下に検討した（表 3.4-3）。

表 3.4-3　事故炉原子炉建屋の長期保全計画（1 例）の提案

保全対象箇所		保全タスク		保全実施時期	検討評価の内容
建屋全体	是正	① 加速度センサ/ジャイロ・センサの各階設置	・対角方向2箇所で各階の床レベル	・できるだけ早期	
		② 追加放出抑制シェルターの設置		・燃料デブリ取り出し開始前	・追加放出量評価による効果の確認
	検査	① 建屋周辺の海塩粒子濃度の測定		・10年毎	
		② 加速度センサによる振動モニタリング	・②のセンサを使用	・センサ設置後、常時モニタリング	・地震時応答スペクトル分析とそのトレンド評価 ・多質点系モデル解析による振動挙動分析とそのトレンド評価
		③ 加速度/ジャイロ・センサによる建屋傾き計測モニタリング	・同上	・同上	・建屋傾斜度測定・評価と地震毎のトレンド評価（建屋全体と外壁傾斜の観点から）
建屋外壁	検査	④ 目視又はサブテラヘルツ波広域検査	・アクセス可能な箇所のうち必要と判断された箇所	・毎年	・望遠鏡による目視、サブテラヘルツ波検査は比較的容易なので、有意な劣化の発生・進展がないことを確認 ・高重要度箇所の定点観測データ（写真等）とトレンド評価
PCV外周壁（特定箇所）	検査	⑤ 目視又はサブテラヘルツ波広域検査	・アクセス可能な箇所のうち必要と判断された箇所	・毎年	・当該壁は建屋強度の多くを分担しているので、劣化の発生・進展がないことを確認 ・高重要度箇所の定点観測データ（写真等）とトレンド評価
4階耐震壁床	検査	① 目視又はサブテラヘルツ波広域検査	・アクセス可能な箇所のうち重要度や現場調査で必要と判断された箇所	・毎年	・有意な劣化の発生・進展がないことを確認 ・高重要度箇所の定点観測データ（写真等）とトレンド評価
		②サブテラヘルツ波局部検査又はコアサンプル採取	・①の検査で必要と判断された箇所	・必要と評価された時	・き裂進展範囲、鉄筋腐食有無の確認
		③ 加速度/ジャイロ・センサによる壁床傾き計測モニタリング	・モニタリングが必要と判断された箇所	・同上	・壁面傾斜度評価と地震毎のトレンド評価
3階耐震壁床	検査	① ② ③	4階と同じ	4階と同じ	4階と同じ
2階耐震壁床	検査	① 目視又はサブテラヘルツ波広域検査	・アクセス可能な箇所	・他作業のついで可能な時	・有意な劣化の発生・進展がないことを確認
1階耐震壁床	検査	① 同上	・同上	・同上	・同上
地下階	検査	① 同上	・同上	・同上	・同上

長期保全計画は、まず是正措置として放射性物質の外部放出を抑制するための前提となるシェルターの設置を前提とするとともに、検査・モニタリングのために必要となるセンサの設置を考慮した。コンクリートの劣化を進展させる原因として海塩粒子が考えられたので、その濃度が従来通りであり、大きな変化がないことを低頻度で確認する計画とした。

次に、計画にあたり、建屋（階）レベル、部材レベル、部位レベルの 3 つの観点から検討した。建屋全体の健全性（耐震強度）を確認するという観点からは建屋全体を視野に入れた検査・モニタリングを行う計画とした。部材レベルでは、水素爆発による事故ダメージのある上層階に着目し、この上層階を構成している耐震壁・床に着目することとした。これは、事故ダメージのある上層階から経年劣化が進展して健全性が損なわれることがないことを計画的に確認することを意図したものである。また、地下及び低層階は事故ダメージを受けておらず、通常の原子炉建屋と同等と考えられ

ることからこれらに保全リソースを重点投入する必要はないと考えたためである。部位レベルの保全は建屋（階）レベル及び部材レベルの検査・モニタリングで懸念部位が特定された時に実施するものであるため、そのような記載とした。

保全実施時期については、センサを設置して検査・モニタリングを実施するものは地震発生時のデータ収録になるので問題ないが、目視検査やサブテラヘルツ波検査はコンクリートの経年劣化を予測して適切な時期を特定することが難しいことが調査・検討で分かった。そのため、経年劣化が進展しやすいと考えられる事故ダメージのある上層階の耐震壁・床を対象とし、その中で代表性のあると考えられる箇所を抽出し、そこを高頻度（毎年）で検査する計画とした。遠隔技術等を活用して検査方法を確立すれば継続的に検査していくことは可能と考えられる。

※　まとめ

(1)　総合的な建屋安全性評価手法の開発

構造健全性の評価のフローを検討し、一連の流れを設定した。具体的には、ⅰ)加速度応答観測値に基づく各層の加速度、変形の推定、ⅱ)等価 1 自由度系への縮約、ⅲ)応答観測値や損傷イメージを用いた解析モデルの性能曲線の補正、ⅳ)被災度区分の設定と観測値による被災度（構造健全性）の判定、ⅴ)将来の地震による応答する推定と構造健全性予測、とした。

(2)　長期保全計画の提案

長期保全計画のイメージを明確にするため、複数の観測データに基づく建屋の構造健全性評価の枠組を検討し、本プロジェクトの中における長期保全計画の位置付けを明確にするとともに、長期保全計画を構成する 3 要素（保全対象箇所、保全方法、保全実施時期）を具体化するための考え方等について検討した。その結果を踏まえ、具体的な長期保全計画の 1 例を示した。

3.5　研究推進

(1) 研究課題間の連携・調整

① 全体会議の開催

研究代表者の下、各研究項目間で整合の取れた研究を進めるため、全体会議を開催して、研究目標や関連情報、スケジュールなどを共有しながら連携して研究を進めた。

令和5年度に実施した全体会議の開催実績を表3.5-1に示す。

表3.5-1　全体会議の開催実績

	開催日時	開催場所	出席者	議題と意見交換の結果
第1回	2023.6.13 13:00-17:00	東北大学 東京分室	(東北大)前田、青木、堂崎、 西脇、Monical、易、大野、堀 (東工大)西村、Sujan (芝浦工大)大橋、日馬、永田 金原、荻野 (大阪公立大)鈴木 (JAEA)上野、菖蒲	(1)最終年度にあたり、本研究のゴールについてイメージを共有した。 (2)研究課題(1)の進捗状況と今後の予定について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (3)研究課題(2)の進捗状況と今後の予定について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (4)研究課題(3)の進捗状況と今後の予定について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (5)研究課題(4)の進捗状況と今後の予定について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (6)本研究の次のステップについて、可能性を議論した。
第2回	2023.10.20 13:00-17:00	東北大学 青葉山キャンパス総合研究棟305室	(東北大)前田、青木、堂崎、 西脇、Monical、易、大野、堀 (東工大)西村、Sujan (芝浦工大)田邉 (木更津高専)藤井 (日本工大)田中 (大阪公立大)鈴木、江川 (JAEA)上野、菖蒲	(1)研究課題(1)の進捗状況と今後の予定について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (2)研究課題(2)の進捗状況と今後の予定について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (3)研究課題(3)の進捗状況と今後の予定について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (4)研究課題(4)の進捗状況と今後の予定について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (5)本研究の次のステップについて、可能性を議論した。
第3回	2024.3.18 13:30-17:00	Jヴィレッジ 第1研修室 ＋Web会議	(東北大)前田、青木、堂崎、 西脇、Monical、易、大野、 Eduardo、倉品、堀 (東工大)西村、Sujan (芝浦工大)田邉(Web) (山形大)藤井(Web) (日本工大)田中 (大阪公立大)鈴木、江川 (JAEA)上野	(1)研究課題(1)の最終成果について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (2)研究課題(2)の最終成果について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (3)研究課題(3)の最終成果について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (4)研究課題(4)の最終成果について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (5)本研究の次のステップについて議論した。

② 国内外機関との連携などの推進

CLADSなどの国内機関との連携を密にして、研究を効率的・効果的に推進できるよう努めた。令和5年度は下記を実施した。

1) NDF(Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation：原子力損害賠償・廃炉等支援機構)国際フォーラム(令和5年8月27日～28日開催)、NDF技術戦略ワークショップ（令和5年9月9日開催）に参加し、1Fの廃炉に関する研究動向を把握

2) CLADS主催第9回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス(Conference for R&D Initiative on Nuclear Decommissioning Technology by the Next Generation：NDEC-9）の関係者への周知と参加

③ プロジェクト推進･取りまとめ

本研究の研究ニーズをより現実に即して把握し、達成目標や活動の方向性を確認し、共通の理解を持って研究を進めるため、本研究の研究課題ごとに東京電力HDの技術者と意見交換することによって研究を推進した。東京電力 HD との意見交換会の開催実績を表3.5-2に示した。

表 3.5-2　東京電力 HD との意見交換会の開催実績

	開催日時	開催場所	出席者	議題と意見交換の結果
第 1 回	2023.9.29 10:30-12:00	Web 会議	東京電力 HD 側：金谷、三浦、高守、福島、出口、桑原、堤、黒澤、堂埜 大学側：前田、西脇、青木、Monical、易、大野、堂﨑（東北大）、西村（東工大）、田邉（芝浦工大）、藤井（木更津高専）、田中（日本工大）、鈴木（大阪公立大）	HyEMSS 英知事業の成果の 1F への活用の仕方、今後の研究の展開の可能性について説明し、以下の意見交換を行った。 ・ 1F の原子炉建屋については、現状での健全性評価もさることながら、長期の健全性をいかに適切に評価し説明するかが社会受容性の観点から重要であり、研究ニーズがある。 ・ 原子炉建屋の長期健全性評価のためには、鉄筋コンクリートの材料評価と構造評価がうまくかみ合った形で発展することが必要である。 ・ 1F の原子炉建屋は、通常の建物と異なり、損傷を受け補修等も困難なまま継続使用する条件にあり、不明点が多いため、保守的な仮定に基づく評価を行わざるを得ないが、可能な限り最確ベースの評価に近づく努力が必要である。
第 2 回	2024.3.19 10:00-11:45	1F 新事務本館 3 階第 2 会議室	東京電力 HD 側：金谷、三浦、宇賀持、堂埜 大学側：前田、青木、Monical、易、大野、Eduardo、堂﨑（東北大）、西村、Sujan（東工大）、田中（日本工大）、鈴木（大阪公立大）、上野（JAEA）	HyEMSS 英知事業の成果の概要と、研究成果の展開と継続プログラムについて説明し、以下の意見交換を行った。 ・ 建屋の健全性がリアルタイムで分かることは魅力的である。特に変位が実測できると良い。また、地盤の変形の影響も含まれることにも留意したい。 ・ 建屋の劣化の兆候が表面の点検で分かった場合に備えて、内部の状態を予め把握できる方法があると良い。例えばサブテラヘルツ波測定や長期変形測定を 5・6 号機で試適用することは可能性がある。 ・ 従来は鉄筋腐食があると使用終了と保守的な判断をしていたが、残留強度をきちんと評価できる方法があれば、実機の合理的な評価が可能になり、説明性向上につながるので、ニーズがある。

また、研究課題間の調整を含め、研究全体に関わる活動を推進するとともに、取りまとめを行った。

学外においては、前述の通り、NDF 福島第一廃炉国際フォーラムなどの国内関連機関の会議体に参加し、必要な情報を研究実施体制内の関係者と共有した。

原子力分野の解析コードの妥当性検証に用いられる PIRT(Phenomena Identification and Ranking Table：重要度ランク表）手法を適用して、本研究で対象としている検査技術の研究開発課題の抽出・整理をサポートするための検討を実施し、課題②の電磁波イメージング技術の開発の方向性についての参考とした。

研究全体の成果[3.5-1]及び課題③の成果[3.5-2]について、原子炉構造工学に関する国際会議である 27th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-27)において報告した。

課題①-1 の動的応答・振動性状の観測及び評価について、第 45 回コンクリート工学講演会（令和 5 年 7 月 5 日～7 日開催）[3.5-3]～[3.5-5]、日本建築学会大会学術講演会（令和 5 年 9 月 12 日～15 日開催）[3.5-6]～[3.5-8]、ニュージーランドで令和 6 年 4 月 9 日に開催された国際会議 NZSEE 2024 Annual Conference[3.5-9]、第 70 回構造工学シンポジウム（令和 6 年 4 月 13 日開催）[3.5-10]にてそれぞれ成果を報告した。また、学術誌に論文を発表した[3.5-11]。

課題①-2 のジャイロセンサを用いた RC 部材の振動時の変形測定について[3.5-12]、[3.5-13]、課題②、課題③のサブテラヘルツ波を用いたコンクリートの含水状態把握について[3.5-14]及びサブテラヘルツカメラを用いた遠隔からの埋設鉄筋可視化技術について[3.5-15]、日本建築学会大会学術講演会（令和 5 年 9 月 12 日～15 日開催）にて成果を報告した。また、サブテラヘルツ波による内部欠陥検出について[3.5-16]及びサブテラヘルツカメラを利用した反射波による RC 内部の可視化技術について[3.5-17]、第 45 回コンクリート工学講演会（令和 5 年 7 月 5 日～7 日開催）にて成果を報告した。サブテラヘルツ反射波を用いた RC 構造物の非破壊検査について、ベルギーで令和 5 年 5 月 22～23 日に開催された国際会議 SMARTINCS’23 にて成果を報告した[3.5-18]。サブテラヘルツカメラを用いた遠隔からの RC 内部の可視化手法について、日本非破壊検査協会 2023 年度 秋季講演大会（令和 5 年 10 月 5～6 日開催）にて成果を報告した[3.5-19]。サブテラヘルツ波を用いた含水状態把握については、MDPI の発

行する学術誌 Buildings の特集号 Advances in Structural and Mechanical Performances of Structures and Materials（令和 6 年 4 月発行）において成果を報告した[3.5-20]。サブテラヘルツ反射波を用いた RC 構造物の非破壊検査については、学術誌 Developments in Built Environment において成果を報告した[3.5-21]。

課題②-2 の成果の一部について、日本分析化学会北海道支部主催のセミナー（令和 5 年 7 月 9 日開催）にて成果を報告した[3.5-22]。

課題③-3 の成果について、壁要素に任意損傷を有する RC 造耐震壁の構造特性劣化に関して第 16 回日本地震工学シンポジウム[3.5-23]に、残存耐震性能評価に関する成果を日本建築学会大会学術講演会[3.5-24]に成果を報告した。

課題④-2 の事故炉原子炉建屋の劣化シナリオとその長期保全計画への反映検討については、原子力学会秋の大会 2023（令和 5 年 9 月 6 日～8 日開催）で検討状況について報告し[3.5-25]、また、同学会春の年会 2024（令和 6 年 3 月 26 日～28 日開催）で最終成果を報告した[3.5-26]。

4. 結言

1F 廃炉作業は数十年を要すると言われている燃料デブリ取り出し後も除染･解体撤去のため、長期に亘って原子炉建屋の安全機能（特に構造強度）が期待されている事業であり、完了するまでの期間、継続的に建屋を直接、検査・モニタリングし、その結果を用いて健全性を評価･確認するとともに、必要に応じて補修等を実施することによって安全機能を確保することは保全学が求める鉄則であり、困難な状況の中でもこれを可能な限り踏襲することが極めて重要である。

そこで、本研究では、前例のない特殊かつ困難な条件下で 1F 原子炉建屋の保全管理を実施することを想定して、戦略的かつ効率的・効果的な保全管理方法確立に向け、下記の技術基盤を整備し、1F 廃炉に貢献することを目的とした。

① 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発
② 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発
③ 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発
④ 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案。

以下に、最終年度として 3 ヵ年全体の最終成果をまとめて示す。

(1) 地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法の開発

① 動的応答・振動性状の観測及び評価

小型模型実験を行い､1 層試験体の非弾性応答と 2 層試験体の弾性応答の観測を行った。また、実験結果に基づき加速度センサの記録から建屋の振動性状（周期特性）、応答変形、復元力特性を推定した。多自由度系については、得られた周期より損傷（剛性低下）の分布を推定する方法を提案し、小型模型実験の結果に適用することでその妥当性を検証した。等価 1 自由度系について、観測記録に基づいて復元力特性（性能曲線と等価粘性減衰定数）を補正し、将来の地震動による応答や被災度を推定するモニタリングシステムを開発した。

② 長期変形性状の観測及び評価（再委託先：東京工業大学）

RC 壁部材を用いた振動実験の結果を基に、配置したセンサから建物挙動を算出する方法を開発した。有限要素法により建物変形を検討するための詳細モデルと、時刻歴応答解析用の簡易モデルを作成した。簡易モデルを用いた地震応答解析を行い建物変形や応力を解析した。配置したセンサの回転角から建物挙動を算出する方法、及び簡易モデルと詳細モデルを用いた有限要素解析により、センサの最適配置を検討するシステムを開発した。その活用例として、詳細モデルの有限要素解析で得られる建物変形と、センサの回転角から得られる建物変形を視覚的にアウトプットして比較し、センサの設置位置の是非を検証した。

(2) 電磁波を用いたコンクリート構造物の損傷検知技術の開発

① テラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：芝浦工業大学）

テラヘルツ波を含む電磁波に対して、偏光を回転させることで反射と透過のイメージ像を測定できることを確認した。中性子イメージング測定を適用した同一の試験体に対して、テラヘルツ波を含む電磁波のイメージ像に変化を確認できるひび割れのパラメータを定量的に解析し、画像情報における検知精度を向上させる周波数帯ならびに偏光活用のデータ処理法を確立した。テラヘルツ波を含む電磁波により検知できる表層下にある損傷として、ひびのサイズや位置、水分ならびに腐食生成物の分布を対象に、測定手法や画像処理

を含む解析方法を明らかにし、テラヘルツ波による接近しての詳細な損傷検知の活用方法を示した。

② サブテラヘルツ波イメージング技術の開発（再委託先：木更津高専）

サブテラヘルツ波による計測システムを設計し、反射と透過のイメージ像を測定できることを確認した。サブテラヘルツ波が透過する塗膜の条件を確認し、遠隔計測に適用可能な周波数領域を特定し、可視像を確認した。中性子イメージング測定と同一のひび割れを有する試験体にサブテラヘルツ波を含む測定システムを適用し、試験体までの距離と電磁波の反射率変化を確認した。異なる腐食レベルに対応する腐食生成物や水分に対する遠隔検査技術としての適用対象を整理した。サブテラヘルツ波を遠方まで照射可能なシステムに改良し、損傷検知を視覚化する解析アルゴリズム検討に提供した。

③ 中性子イメージング技術によるテラヘルツ波イメージング技術の検証
（連携先：原子力機構）

テラヘルツイメージング技術の検証に用いる RC 試験体の仕様及び中性子イメージング実験条件を決定し、複数試験体の自動連続撮像システムを開発した。JRR-3 の TNRF において中性子イメージング実験を行い、RC 試験体内部のひび割れ位置とサイズを定量的に評価し、鉄筋とコンクリートのサイズについて検討の必要性を明らかにした。試験体内部にひび割れを発生させた試験体に対して、JRR-3 の TNRF 等を使用した高分解能 3 次元中性子イメージング実験を行い、内部のひび割れの位置とサイズ、深さを明らかにした。さらに、様々な条件の RC に対して、試験体内部の鉄筋、空隙、骨材の位置の 3 次元画像データのほか、含水率を考慮した中性子透過率のデータを蓄積した。

(3) 損傷検知情報に基づくコンクリート材料・構造物の性能評価法の開発

① コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価

急速凍結融解試験によって段階的に力学性能を低下させたコンクリート試験体に対して、周波数を連続的に変化させてサブテラヘルツ波イメージング技術による測定を行い、導入した劣化状態（力学特性）との関係を得た。周波数を変化させたスペクトル測定により得られた結果から、測定に適した周波数を選択して測定方法のキャリブレーションを行うことで、圧縮強度やヤング係数などの力学特性の低下を推定できることが確認された。より高度なキャリブレーションを行うためには、劣化の程度や使用材料、適用する周波数などパラメータを拡充する必要があることを明らかにした。

② 鉄筋腐食と付着不良・剥離等に基づく材料特性の評価（再委託先：日本工業大学）

サブテラヘルツ光学系測定装置の距離における適用範囲は、赤外線サーモグラフィーのような長距離による測定性能と電磁波レーダの測定性能を併せ持つ測定系であると考えられ、内部劣化をコンクリート表面と並行に発生したひび割れの検知と限定した時、本研究では測定距離 240 m 程度まで測定でき、幅広い適用可能性が示された。サブテラヘルツ光学系測定装置の測定角度の適用範囲は、内部劣化と含水率測定ともに、測定角度によって鉄筋の影響を示唆し、測定角度 90±5° 以内に抑えることで鉄筋の影響を除外し評価できる可能性を示した。本研究の目標は測定対象から十分に離れた距離から測定することを目標としているため、測定角度を 90±5° でも十分な適用範囲であることを示した。

③ 材料劣化特性に基づく部材の耐震性能評価（再委託先：大阪公立大学）

凍結融解サイクルを与えた後の圧縮強度試験結果を通じて、コンクリート単体の損傷程度と力学特性の低下の関係について整理した。これを基に、損傷程度に応じた 3 段階のコンクリート圧縮側構成則を構築した。これに加え、塩害や中性化等による経時変化を想定した壁筋とコンクリートの付着劣化を考慮することで、壁面の損傷程度「軽微」、「小」、「中」、「大」の 4 パターン及び損傷箇所 7 パターンによる 28 パターンの有損傷モデルに無損傷モデルを加えた計 29 パターンの RC 耐震壁について、FEM 解析を通して荷重変形関係と破壊性状を比較検討し、無損傷モデルに対する耐力、初期剛性及び 2 次剛性の残存性能を整理し、損傷を有する耐震壁の性能評価マトリクスを作成した。

(4) 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案

① 総合的な建屋安全性評価手法の開発

構造健全性の評価のフローを検討し、一連の流れを設定した。具体的には、ⅰ)加速度応答観測値に基づく各層の加速度、変形の推定、ⅱ)等価 1 自由度系への縮約、ⅲ)応答観測値や損傷イメージを用いた解析モデルの性能曲線の補正、ⅳ)被災度区分の設定と観測値による被災度（構造健全性）の判定、ⅴ)将来の地震による応答する推定と構造健全性予測、とした。

② 長期保全計画の提案

長期保全計画のイメージを明確にするため、複数の観測データに基づく建屋の構造健全性評価の枠組を検討し、本プロジェクトの中における長期保全計画の位置付けを明確にするとともに、長期保全計画を構成する 3 要素（保全対象箇所、保全方法、保全実施時期）を具体化するための考え方等について検討した。その結果を踏まえ、具体的な長期保全計画の 1 例を示した。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに CLADS 等、1F との連携を密にし、研究実施計画を推進するための打ち合わせや会議等を開催した。研究担当者間及び東京電力 HD との連携を深め、プロジェクト全体の調整、目標や実施内容、成果などの情報共有、意見交換等に努めた。

以上の通り、3 ヵ年計画の所期の目標を達成した。

今後の課題としては、本研究で開発した技術の実機実装に向け、事故炉原子炉建屋の健全性に関する観測方法、建屋の劣化・破壊に関する予測法の開発及びそれらの実証等が挙げられる。特に、本研究で開発した地震等の外乱応答モニタリングによる建屋の振動性状・応答評価法は、現時点での事故炉の損傷を考慮した建屋の健全性を評価するものであり、将来の劣化を想定した評価法への発展については今後の課題として挙げられる。また、目視検査やサブテラヘルツ波検査はコンクリートの経年劣化を予測して適切な時期を特定することが難しいことが調査・検討で分かった。遠隔技術等を活用した検査方法の確立も今後の課題として挙げられる。

参考文献

概略

［Ⅰ］ 廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議，東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ，2019，https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20191227.pdf（参照：2023 年 4 月 13 日）．

［Ⅱ］ 原子力損害賠償・廃炉等支援機構，東京電力(株)福島第一原子力発電所廃炉のための技術戦略プラン 2022，https://dd-ndf.s2.kuroco-edge.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20221011_SP2022FT.pdf（参照：2023 年 4 月 13 日）．

［Ⅲ］ 東海大学，里見ビジョン（SATOMI VISION 2013），https://www.tohoku.ac.jp/japanese/profile/president/01/president0101/SATOMI_VISION2013.pdf（参照：2023 年 4 月 13 日）．

［Ⅳ］ 東海大学，東北大学ビジョン 2030 最先端の創造、大変革への挑戦，2018，https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/newsimg/tohoku_uni_vision2030.pdf（参照：2023 年 4 月 13 日）．

［Ⅴ］ 東北大学「グリーン未来創造機構」，https://www.ggi.tohoku.ac.jp/（参照：2023 年 4 月 13 日）．

3.1 節

[3.1.2-1] 気象庁，強震観測データ，強震波形（平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震），https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html（参照：2024 年 1 月 18 日）．

[3.1.2-2] 東京電力株式会社，福島第一原子力発電所　特定原子力施設に係る実施計画，Ⅱ特定原子力施設の設計，設備，第 3 編（保安に係る補足説明），1.3 地震及び津波への対応，Ⅲ-3.1.2-3-添 3-18～54，平成 31 年 2 月 27 日，https://www.tepco.co.jp/decommission/information/implementation/pdf/3_1_3.pdf（参照：2024 年 1 月 18 日）.

[3.1.2-3] 東京電力株式会社，福島第一原子力発電所における平成 23 年東北地方太平洋沖地震時に取得された地震観測記録の分析に係わる報告，平成 23 年 5 月 16 日，p.22，https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110516ab.pdf（参照：2024 年 1 月 18 日）.

3.3 節

[3.3.1-1] 橋本紳一郎，橋本親典，渡辺健，上田隆雄，液体窒素を用いたコンクリートの簡易的凍結融解試験の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，2005，pp.757-762.

[3.3.1-2] 小林知大，西脇智哉，Narantogtokh Bayarjavkhlan，田中章夫，有田剛士，田邉匡生，濱崎仁，疋島宗哉，佐藤大輔，藤井翔，サブテラヘルツカメラを用いた遠隔からの埋設鉄筋可視化技術に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），A-1 材料施工，2023，pp.207-208.

[3.3.1-3] R. Piesiewicz, C. Jansen, S. Wietzke, D. Mittleman, M. Koch, T. Kürner, Properties of building and plastic materials in the THz range, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol.28, 2007, pp.363-371.

[3.3.1-4] T. Tanabe, T. Kanai, K. Kuroo, T. Nishiwaki, Y. Oyama, Non-Contact Terahertz Inspection of Water Content in Concrete of Infrastructure Buildings, World Journal of Engineering and Technology, Vol.6, No.2, 2018, pp.275-281.
[3.3.1-5] S.R. Tripathi, H. Ogura, H. kawagoe, H. Inoue, T. Hasegawa, K. Takeya, K. Kawase, Measurement of chloride ion concentration in concrete structures using terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS), Corrosion Science, Vol.62, 2012, pp.5-10.
[3.3.2-1] 有田剛士、田中章夫、西脇智哉：遠距離測定に向けたサブテラヘルツ波による内部欠陥検出の基礎的検討，日本コンクリート工学会年次大会論文集，Vol.45, No.1, 2023, pp.1450-1455.
[3.3.3-1] DIANA BV.: DIANA Finite Element Analysis User’s Manual Release 10.5, 2021.
[3.3.3-2] 小池拓矢，細谷典弘，鈴木裕介，前田匡樹，尾形芳博：RC 造耐震壁の残存耐震性能評価とひび割れに基づく損傷量評価に関する研究，日本建築学会構造工学論文集，Vol.63B, 2017, pp.447-454.
[3.3.3-3] K. Maekawa, H. Okamura, and A. Pinanmas, Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete. Spon Press, 2003.
[3.3.3-4] S. Hsieh, E. Ting, and W. Chen, A Plasticity-Fracture Model for Concrete. International Journal of Solids and Structures, Vol.18, 1982, pp.181-197.
[3.3.3-5] F. J. Vecchio, M. P. Collins: Compression response of cracked reinforced concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.119, No.12, 1993, pp.3590-3610.
[3.3.3-6] D. A. Hordijk, Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.
[3.3.3-7] 大岡督尚，橘高義典，渡部憲：コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.529, 2000, pp.1-6.
[3.3.3-8] CEB: CEB-FIP MODEL CODE 2010 DESIGN CODE, Tomas Telford Service Lid.
T. Paulay, Moment Redistribution in Continuous Beam of Earthquake Resistant Multistory Reinforced Concrete Frames, Bulletin of New Zealand National Society for Engineering, Vol.9, No.4, 1976, pp.205-212.

3.4 節

[3.4-1] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構，東京電力(株)福島第一原子力発電所廃炉のための技術戦略プラン 2022,
https://dd-ndf.s2.kuroco-edge.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20221011_SP2022FT.pdf（参照：2023 年 4 月 3 日）.
[3.4-2] 土木研究所資料 飛来塩分量全国調査(III)－調査結果およびデータ集－，建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室，ISSN 0386-5878 土木研究所資料第 2687 号，1988 年 12 月.
[3.4-3] 石山他_津波被害を受けたコンクリート材料の塩分浸透状況の調査_日本建築学会技術報告集　第 22 巻　第 50 号，2016 年 2 月，pp.377-380.
[3.4-4] 原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説 2015 年改訂版，日本建築学会，2015 年 12 月.

[3.4-5] 篠原，今本，関，清原，野口，マルコフ連鎖モデルに基づく軍艦島構造物群の寿命予測と遷移確率に及ぼす要因に関する研究，2015 年度日本建築学会関東支部研究報告集Ⅰ，2016 年 3 月.
[3.4-6] 豊田秀樹著，マルコフ連鎖モンテカルロ法 第 8 刷，朝倉書店統計ライブラリー，2020 年 6 月.

3.5 節

[3.5-1] M. MAEDA, T. Tanabe, T. Nishiwaki, T. Aoki, K. Dozaki, K. Nishimura, S. Fujii, F. Ueno, A. Tanaka, Y. Suzuki, J. Monical, Development of a Hybrid Evaluation Method for Long-Term Structural Soundness of Nuclear Reactor Buildings Using Monitoring and Damage Imaging Technologies - Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project -, Proc. Th.2.B-04, SMiRT-27, Yokohama, March 4-8, 2024.
[3.5-2] T. Nishiwaki, S. Hara, C. Kobayashi, K. Arita, A. Tanaka, Y. Suzuki, Feasibility Study on Noncontact and Nondestructive Measurements of Mechanical Performance Degradation in RC Structures using Sub-Terahertz Wave, Proc. Th.2.B-02, SMiRT-27, Yokohama, March 4-8, 2024.
[3.5-3] J. Monical, B. Brito, H. Alwashali, M. Maeda, ESTIMATING SEISMIC DEMAND USING SENSOR DATA: EVALUATION OF ELASTIC SPECTRA IN THE LINEAR RANGE OF RESPONSE, 第 45 回コンクリート工学講演会，令和 5 年 7 月 5 日～7 日.
[3.5-4] Z. YI, A. Oono, J. Monical, M. Maeda, RESPONSE PREDICTION AND DAMAGE EVALUATION OF A REINFORCED CONCRETE STRUCTURE BASED ON LIMITED SENSOR DATA AND THE KALMAN METHOD, 第 45 回コンクリート工学講演会，令和 5 年 7 月 5 日～7 日.
[3.5-5] 大野歩美，易卓然，前田匡樹，RC 造建物の構造健全性評価のための観測記録に基づく性能曲線の補正法と性能曲線を用いた被災度区分判定法の検討，第 45 回コンクリート工学講演会，令和 5 年 7 月 5 日～7 日.
[3.5-6] 前田匡樹，易卓然，大野歩美，Jonathan Monical，鈴木祐介，関松太郎，Response prediction of an RC building using analytical model updated with seismic response observation data Part 1 Basic concept of updating of analytical model and response prediction，日本建築学会大会学術講演会，令和 5 年 9 月 12 日～15 日.
[3.5-7] 大野歩美，易卓然，前田匡樹，Jonathan Monical，鈴木祐介，関松太郎，地震応答観測データに基づき補正した解析モデルによる RC 造建物の応答推定　その 2 検討用解析モデルの概要と異なる地震波に対する適用，日本建築学会大会学術講演会，令和 5 年 9 月 12 日～15 日.
[3.5-8] 易卓然，大野歩美，前田匡樹，Jonathan Monical，鈴木祐介，関松太郎，Response prediction of an RC building using analytical model updated with seismic response observation data Part 3: Application to cases with difference between real behavior and analytical model，日本建築学会大会学術講演会，令和 5 年 9 月 12 日～15 日.
[3.5-9] Z. Yi, A. Oono, J. Monical, M. Maeda, M. Seki, Damage Level Prediction of RC Building for Future Earthquakes Based on Seismic Response Observation, NZSEE 2024 Annual Conference, April 9, 2024.

[3.5-10] Z. YI, A. Oono, J. Monical, M. Maeda, M. Seki, UPDATING OF PERFORMANCE CURVE OF AN EQUIVALENT SINGLE-DEGREE-OFFREEDOM SYSTEM AND DAMAGE LEVEL CLASSIFICATION BASED ON SEISMIC RESPONSE OBSERVATION, 第70回構造工学シンポジウム, 令和6年4月13日.

[3.5-11] Z. YI, A. Oono, J. Monical, M. Maeda, M. Seki, UPDATING OF PERFORMANCE CURVE OF AN EQUIVALENT SINGLE-DEGREE-OF-FREEDOM SYSTEM AND DAMAGE LEVEL CLASSIFICATION BASED ON SEISMIC RESPONSE OBSERVATION,構造工学論文集B, 70B巻, pp.40-48. https://doi.org/10.3130/aijjse.70B.0_40

[3.5-12] Sujan PRADHAN, 佐田和寛, 西村康志郎, ジャイロセンサを用いたRC 部材の振動時の変形測定, その1　RC 片持ち部材の振動実験, 日本建築学会大会学術講演会, 令和5年9月15日.

[3.5-13] 佐田和寛, Sujan PRADHAN, 西村康志郎, ジャイロセンサを用いたRC 部材の振動時の変形測定, その2　センサ回転角とたわみ曲線との同定結果, 日本建築学会大会学術講演会, 令和5年9月15日.

[3.5-14] 有田剛士, 田中章夫, 西脇智哉, 小林知大, 田邉匡生, 濱崎仁, 疋島宗哉, 佐藤大輔, 藤井翔, サブテラヘルツ波を用いたコンクリートの含水状態把握に向けた基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演会, 令和5年9月15日.

[3.5-15] 小林知大, 西脇智哉, Narantogtokh Bayarjavkhlan, 田中章夫, 有田剛士, 田邉匡生, 濱崎仁, 疋島宗哉, 佐藤大輔, 藤井翔, サブテラヘルツカメラを用いた遠隔からの埋設鉄筋可視化技術に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）, A-1 材料施工, 2023.9, pp.207-208.

[3.5-16] 有田剛士, 田中章夫, 西脇智哉, 遠距離測定に向けたサブテラヘルツ波による内部欠陥検出の基礎的検討, 第45回コンクリート工学講演会, 令和5年7月7日.

[3.5-17] 小林知大, 原星海, 西脇智哉, 田中章夫, サブテラヘルツカメラを利用した反射波による鉄筋コンクリート内部の可視化技術に関する基礎的研究, 第45回コンクリート工学講演会, 令和5年7月5日～7日.

[3.5-18] C. Kobayashi, T. Nishiwaki, S. Hara, T. Tanabe, T. Oohashi, H. Hamasaki, S. Hikishima, A. Tanaka, K. Arita, Fundamental research on non-destructive testing of reinforced concrete structures using sub-terahertz reflected waves, SMARTINCS’23 Conference on Self-Healing, Multifunctional and Advanced Repair Technologies in Cementitious Systems, Belgium, May 22-23, 2023.

[3.5-19] 小林知大, 西脇智哉, 田中章夫, 有田剛士, 田邉匡生, 濱崎仁, 疋島宗哉, 佐藤大輔, 城所健, 藤井翔, サブテラヘルツカメラを用いた遠隔からの鉄筋コンクリート内部の可視化手法に関する基礎的研究, 日本非破壊検査協会 2023年度 秋季講演大会, pp.113-116, 令和5年10月5日～6日.

[3.5-20] A. Tanaka, K. Arita, C. Kobayashi, T. Nishiwaki, T. Tanabe, S. Fujii, Fundamental Properties of Sub-THz Reflected Waves for Water Content stimation of Reinforced Concrete Structures, Buildings, 14(4), 1076, 2024, https://doi.org/10.3390/buildings14041076

[3.5-21] C. Kobayashi, T. Nishiwaki, T. Tanabe, T. Oohashi, H. Hamasaki, S. Hikishima, A. Tanaka, K. Arita, S. Fujii, D. Sato, T. Kidokoro, Non-destructive testing of reinforced concrete structures using sub-terahertz reflected waves, Developments in Built Environment, Vol.18, 2024, 100423. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100423
[3.5-22] 藤井翔，赤外光～サブテラヘルツ光を利用した分析：マイクロプラスチックやコンクリートを対象に，日本分析化学会北海道支部主催第 39 回緑蔭セミナー招待講演，令和 5 年 7 月 9 日.
[3.5-23] 江川慶大，鈴木裕介，谷口与史也，壁要素に任意損傷を有する RC 造耐震壁の構造特性劣化に関する検討，第 16 回日本地震工学シンポジウム，令和 5 年 11 月 23 日～25 日.
[3.5-24] 江川慶大，鈴木裕介，谷口与史也，壁要素に任意損傷を有する RC 造耐震壁の残存耐震性能評価，日本建築学会大会学術講演会，令和 5 年 9 月 12 日～15 日.
[3.5-25] 堂﨑浩二，青木孝行，事故炉原子炉建屋の劣化シナリオとその長期保全計画への反映検討，日本原子力学会秋の大会 2023 予稿集 3F12，令和 5 年 9 月.
[3.5-26] 堂﨑浩二，青木孝行，事故炉原子炉建屋の劣化シナリオとその長期保全計画への反映検討（続報），日本原子力学会春の年会 2024 予稿集 1A18，令和 6 年 3 月.