

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)

-FY2022 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource  
Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 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 Institute, Sector of Fukushima Research and Development  
Tohoku University

May 2024

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](mailto: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](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

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・人材育成推進事業—

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
廃炉環境国際共同研究センター

東北大学

(2023年12月4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4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4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を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2年度目である令和4年度は、令和3年度に行った(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、(5)研究推進の研究項目についての具体的な研究方法や研究の方向付けに基づき、令和3年度に引き続き試験や活動を行った。

---

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

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)

— FY2022 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

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

Tohoku University

(Received December 4, 2023)

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 FY2022.

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 in FY2022.

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 FY2022, the second year of the three-year plan, some tests and other activities on the following research items were conducted following FY2021, based on the specific research methods and research directions clarified in FY2021. (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.

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
付録 成果報告書 .....	15

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
Appendix Result Report .....	15

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（日英共同研究）

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	山崎 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	渡邊 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（日英共同研究 2 課題、日露共同研究 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 号機ペダ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	渡邊 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

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	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とティアップ型人材育成	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（日英共同研究）

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）会議での審議を経て、採択課題を決定した。

## 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
$\alpha$ / $\beta$ / $\gamma$ 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	渡邊 豊	東北大学
$\beta$ 、 $\gamma$ 、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）

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・日露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



課題名	研究代表者	所属機関
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 啓太郎	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
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	浅間 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）

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・日露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 $\gamma$ 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
$\alpha$ 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
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

課題名	研究代表者	所属機関
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

本報告書は、以下の課題の令和4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 4 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 R04I026)

成果報告書

令和 5 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4年度分の研究成果を取りまとめたものである。



目次

概略	ix
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4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4年度の研究スケジュール	2-5
3. 実施内容及び成果	3-1
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4年度)	3-1
3.1.1 動的応答・振動性状の観測(令和3年度～令和4年度)	3-1
3.1.2 動的応答・振動性状の評価(再委託先:岡山大学)(令和4年度)	3-10
3.1.3 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4年度)	3-25
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4年度)	3-40
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4年度)	3-40
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4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4年度)	3-53
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4年度)	3-58
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4年度)	3-58
3.3.2 鉄筋腐食と付着不良・剥離など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4年度)	3-67
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)	3-81
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4年度)	3-94
3.5 研究推進	3-106
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
		客員教授	青木 孝行
		特任教授	堂崎 浩二
		准教授	西脇 智哉
再委託先			
	国立大学法人岡山大学	准教授	アルワシャリ ハモード
	学校法人芝浦工業大学	教授	田邊 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4年度研究スケジュール	....	2-6
表 3.1.1-1	試験体の特性	....	3-2
表 3.1.1-2	試験体 A1 の水平剛性の実験値と計算値	....	3-3
表 3.1.1-3	材料ダンパーと減衰推定	....	3-7
表 3.1.2-1	入力地震波・加振ケース	....	3-10
表 3.1.2-2	係数倍法による被災度予測結果	....	3-23
表 3.1.2-3	特性点フィッティング法による被災度予測結果	....	3-23
表 3.1.3-1	正弦波の加振と固有周期の変化	....	3-28
表 3.1.3-2	静的加力計画	....	3-30
表 3.1.3-3	梁及び床の断面リスト	....	3-35
表 3.1.3-4	柱及び壁の断面リスト	....	3-36
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	....	3-60
表 3.3.2-1	鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価のための試験体水準	....	3-68
表 3.3.2-2	引き抜き時の力学特性（一体性）評価のためのコンクリートの計画調合	....	3-71
表 3.3.2-3	含水率評価のためのコンクリートの調合計画	....	3-72
表 3.3.3-1	解析対象試験体の諸元	....	3-81
表 3.3.3-2	コンクリートの材料特性	....	3-84
表 3.3.3-3	鉄筋の材料特性	....	3-84
表 3.3.3-4	仮定した損傷程度と力学特性の関係	....	3-87
表 3.3.3-5	耐震性能低減係数 $\eta$ の値	....	3-92
表 3.3.3-6	性能評価マトリクス	....	3-92
表 3.5-1	全体会議の開催実績	....	3-106
表 3.5-2	研究課題ごとのグループ会議の開催実績（1/2）	....	3-106
表 3.5-2	研究課題ごとのグループ会議の開催実績（2/2）	....	3-107
表 3.5-3	東電との意見交換会の開催実績（1/2）	....	3-108
表 3.5-3	東電との意見交換会の開催実績（2/2）	....	3-109

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	1F 建屋の損傷前と損傷後の解析モデルの質量・剛性分布の比較	....	3-1
図 3. 1. 1-2	センサの位置を変えた場合の誤差の推定	....	3-1
図 3. 1. 1-3	振動実験の試験体及び応答の計測	....	3-2
図 3. 1. 1-4	静荷重実験による水平荷重の測定	....	3-3
図 3. 1. 1-5	自由振動実験による応答の時刻歴	....	3-3
図 3. 1. 1-6	自由振動実験による減衰比の推定	....	3-4
図 3. 1. 1-7	フーリエ変換	....	3-4
図 3. 1. 1-8	質量を変化させた自由振動実験による固有周期 T	....	3-5
図 3. 1. 1-9	最大応答の観測値と応答スペクトルの比較	....	3-5
図 3. 1. 1-10	最大応答変位の観測値と計算値の比較	....	3-6
図 3. 1. 1-11	平滑化した変位応答スペクトル	....	3-7
図 3. 1. 1-12	ダンパーを設置した試験体	....	3-7
図 3. 1. 1-13	周波数応答関数 (FRF) 法による減衰定数 h の同定	....	3-8
図 3. 1. 1-14	変位応答スペクトルと減衰を付加した試験体の応答変位	....	3-8
図 3. 1. 1-15	加速度応答スペクトルと減衰を付加した試験体の応答加速度	....	3-9
図 3. 1. 1-16	減衰を付加した試験体の応答変位の計算値と観測値の比較	....	3-9
図 3. 1. 1-17	減衰を付加した試験体の応答加速度の計算値と観測値の比較	....	3-9
図 3. 1. 2-1	研究の概念図	....	3-10
図 3. 1. 2-2	試験体モデル	....	3-10
図 3. 1. 2-3	実験結果及び解析結果の性能曲線	....	3-11
図 3. 1. 2-4	実験の被災度区分判定	....	3-11
図 3. 1. 2-5	補正曲線の概念図	....	3-12
図 3. 1. 2-6	誤差の求め方	....	3-12
図 3. 1. 2-7	最適補正曲線と平均補正曲線	....	3-13
図 3. 1. 2-8	平均誤差の推移 (経験領域)	....	3-13
図 3. 1. 2-9	平均誤差の推移 (未経験領域を含む性能曲線全体)	....	3-13
図 3. 1. 2-10	Run. 3 までの観測記録による補正係数の分布	....	3-14
図 3. 1. 2-11	Run. 9 までの観測記録による補正係数の分布	....	3-14
図 3. 1. 2-12	特性点フィッティング法の概念図	....	3-16
図 3. 1. 2-13	特性点フィッティング法による補正曲線	....	3-17
図 3. 1. 2-14	Run. 1 平均補正曲線による未経験領域の応答推定	....	3-18
図 3. 1. 2-15	Run. 1 平均補正曲線による未経験領域の応答推定結果	....	3-18
図 3. 1. 2-16	Run. 2 平均補正曲線による未経験領域の応答推定結果	....	3-19
図 3. 1. 2-17	Run. 3 平均補正曲線による未経験領域の応答推定結果	....	3-19
図 3. 1. 2-18	Run. 4 最適補正曲線による未経験領域の応答推定結果	....	3-19

図 3. 1. 2-19	Run. 5 最適補正曲線による未経験領域の応答推定結果	....	3-20
図 3. 1. 2-20	等価粘性減衰定数の補正方法	....	3-20
図 3. 1. 2-21	Run. 3 補正曲線による未経験領域の応答推定結果	....	3-21
図 3. 1. 2-22	Run. 4 補正曲線による未経験領域の応答推定結果	....	3-21
図 3. 1. 2-23	Run. 5 補正曲線による未経験領域の応答推定結果	....	3-21
図 3. 1. 2-24	特性点に基づく被災度区分の例	....	3-22
図 3. 1. 3-1	試験体図	....	3-26
図 3. 1. 3-2	振動実験セットアップ	....	3-26
図 3. 1. 3-3	振動実験装置図	....	3-27
図 3. 1. 3-4	センサの取り付け位置とたわみ曲線の関係	....	3-27
図 3. 1. 3-5	加振 No. 3 (主筋降伏) での角速度と時間の関係	....	3-28
図 3. 1. 3-6	角速度の高さ方向の分布	....	3-28
図 3. 1. 3-7	静的加力実験装置図	....	3-30
図 3. 1. 3-8	静的加力実験における荷重-変形関係	....	3-31
図 3. 1. 3-9	試験体 No. 1 と No. 2 のひび割れ図	....	3-31
図 3. 1. 3-10	振動実験と静的加力実験の荷重-変形関係の比較	....	3-32
図 3. 1. 3-11	変位計とセンサによる壁頭変位の比較 (静的加力実験)	....	3-32
図 3. 1. 3-12	変位計とセンサによる壁頭変位の比較 (振動実験)	....	3-32
図 3. 1. 3-13	原子炉建屋を模した詳細モデル	....	3-34
図 3. 1. 3-14	詳細モデルに類似した簡易モデル	....	3-34
図 3. 1. 3-15	東西方向の固有振動モード	....	3-37
図 3. 1. 3-16	南北方向の固有振動モード	....	3-37
図 3. 1. 3-17	ねじれの固有振動モード	....	3-37
図 3. 1. 3-18	簡易モデルへの入力加速度 (時間間隔 0.01 s)	....	3-38
図 3. 1. 3-19	地下階の層せん断力 (ベースシア) と建屋頂部の変位との関係	....	3-38
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	....	3-40
図 3. 2. 1-2	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	....	3-41
図 3. 2. 1-3	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	....	3-41
図 3. 2. 1-4	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)	....	3-42
図 3. 2. 1-5	スペクトルの偏光強度比 (亀裂の幅 : 3 mm)	....	3-43
図 3. 2. 1-6	亀裂の幅による偏光強度減衰位置の変化	....	3-43
図 3. 2. 1-7	スペクトルの偏光強度比 (かぶり深さ : 10 mm)	....	3-44
図 3. 2. 1-8	かぶり深さによる偏光強度ピーク位置の変化	....	3-44
図 3. 2. 1-9	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	....	3-45
図 3. 2. 1-10	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	....	3-45
図 3. 2. 1-11	鉄酸化物を Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> に調製した時の吸収スペクトルの変化	....	3-45
図 3. 2. 1-12	含水率が異なる木材の透過率 (63.5 GHz)	....	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 $\alpha$ -FeOOH、 $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 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 3.2.3-1	試験条件決定に用いた試験体の図と測定結果	....	3-53
図 3.2.3-2	RC 模擬試験体の仕様の概念図	....	3-54
図 3.2.3-3	試験体	....	3-55
図 3.2.3-4	45° でカットした試験体の 3D 像 (a) 及び中央部断面像 (b)	....	3-56
図 3.2.3-5	き裂を導入した試験体 (a) 及び中央部断面像 (b)	....	3-56
図 3.2.3-6	鉄筋を入れた試験体の 3D 像 (a) 及び中央部断面像 (b)	....	3-57
図 3.3.1-1	測定系概要	....	3-59
図 3.3.1-2	サブテラ/テラヘルツの測定可能深さの確認	....	3-59
図 3.3.1-3	急速凍結融解試験装置	....	3-61
図 3.3.1-4	加熱温度と力学特性の関係	....	3-62
図 3.3.1-5	加熱温度ごとのサブテラヘルツ画像	....	3-63
図 3.3.1-6	加熱温度と反射率の関係	....	3-63
図 3.3.1-7	反射率比と力学特性の関係	....	3-63
図 3.3.1-8	急速凍結融解試験サイクルごとのコンクリートの力学特性	....	3-64
図 3.3.1-9	急速凍結融解試験前後の試験体	....	3-64
図 3.3.1-10	サブテラヘルツ反射率比と力学特性の関係（円柱試験体）	....	3-65
図 3.3.1-11	カメラを用いた測定系の概要	....	3-65
図 3.3.1-12	カメラを用いたスリット（模擬ひび割れ）の測定結果	....	3-66
図 3.3.2-1	実験(1)の RC 試験体の概要	....	3-70
図 3.3.2-2	実験(3)の RC 試験体の概要	....	3-70
図 3.3.2-3	鉄筋腐食によるひび割れを模擬した付着強度試験体	....	3-71
図 3.3.2-4	コンクリート試験体の吸水方法	....	3-72
図 3.3.2-5	コンクリート壁試験体の吸水範囲と測定範囲	....	3-72
図 3.3.2-6	付着試験方法の概要	....	3-73
図 3.3.2-7	サブテラヘルツ波測定系装置	....	3-73
図 3.3.2-8	反射率とひび割れ幅の関係（絶乾時）	....	3-74
図 3.3.2-9	腐食グレードによるひび割れ幅と付着強度（一体性）の関係	....	3-75
図 3.3.2-10	模擬ひび割れによる付着強度（一体性）の整理	....	3-76
図 3.3.2-11	RC 試験体の反射率分布	....	3-77
図 3.3.2-12	選定した周波数における質量含水率と反射率の関係	....	3-78
図 3.3.2-13	周波数ごとの容積含水率と反射率の関係	....	3-79
図 3.3.2-14	RC 壁試験体における反射率分布	....	3-80
図 3.3.3-1	解析対象試験体の形状及び配筋	....	3-82
図 3.3.3-2	実験における加力状況	....	3-82

図 3.3.3-3	解析モデル (Solid 要素) ・境界条件	....	3-83
図 3.3.3-4	解析モデル (Beam 要素)	....	3-83
図 3.3.3-5	コンクリートの材料構成則	....	3-84
図 3.3.3-6	層せん断力-層間変形角関係	....	3-85
図 3.3.3-7	最大耐力時の最大主ひずみ分布	....	3-86
図 3.3.3-8	実験の最終破壊状況	....	3-86
図 3.3.3-9	仮定した壁面コンクリートの損傷箇所 (1/2)	....	3-87
図 3.3.3-9	仮定した壁面コンクリートの損傷箇所 (2/2)	....	3-88
図 3.3.3-10	各損傷を有するモデルの層せん断力-層間変形角関係	....	3-89
図 3.3.3-11	無損傷モデルに対する有損傷モデルの各構造性能比	....	3-90
図 3.3.3-12	損傷程度が小である各モデルの最大耐力時の最大主ひずみ分布 (1/2)	....	3-90
図 3.3.3-12	損傷程度が小である各モデルの最大耐力時の最大主ひずみ分布 (2/2)	....	3-91
図 3.3.3-13	右半分の損傷程度が中である有損傷モデルの最大主ひずみ分布	....	3-91
図 3.3.3-14	各モデルのエネルギー概念図	....	3-92
図 3.4-1	加速度応答観測値に基づく各層の加速度・変形の推定	....	3-95
図 3.4-2	等価 1 自由度系への縮約	....	3-96
図 3.4-3	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	....	3-96
図 3.4-4	被災度区分の設定	....	3-96
図 3.4-5	観測値による被災度 (構造健全性) の判定	....	3-97
図 3.4-6	将来の地震による応答推定と構造健全性予測	....	3-97
図 3.4-7	負圧管理による閉じ込め機能 (気相部) の構築例	....	3-98
図 3.4-8	本研究の中における長期保全計画の位置付け	....	3-99
図 3.4-9	長期保全計画のイメージ	....	3-101
図 3.4-10	建屋の着目すべき箇所と検査・モニタリング方法	....	3-101
図 3.4-11	「損傷リスク重要度」概念の導入	....	3-102
図 3.4-12	RC の劣化シナリオ	....	3-102
図 3.4-13	「保全守備範囲」の絞り込み	....	3-103
図 3.4-14	「保全守備範囲」の絞り込みと「重要度」概念の導入	....	3-103
図 3.4-15	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	....	3-104
図 3.4-16	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	....	3-104

略語一覧

CLADS	: Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science	(廃炉環境国際共同研究センター)
東電	: 東京電力ホールディングス株式会社	
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	
RC	: Reinforced Concrete	(鉄筋コンクリート)
FE	: Finite Element	(有限要素)
FEM	: Finite Element Method	(有限要素法)
JRR-3	: Japan Research Reactor No. 3	(研究用原子炉 JRR-3)
TNRF	: Thermal Neutron Radiography Facility	(熱中性子ラジオグラフィ装置)
MEMS	: Micro Electro Mechanical Systems	(微小電気機械システム)
IMU	: Inertial Measurement Unit	(慣性計測装置)
JIS	: Japanese Industrial Standards	(日本産業規格)
THz-TDS	: Terahertz Time-Domain Spectroscopy	(テラヘルツ時間領域分光)
AE 剤	: Air Entraining Agent	(空気連行剤)
JSCE	: The Japan Society of Civil Engineers	(公益社団法人土木学会)
PC 鋼棒	: Prestressed Concrete Steelbar	(プレストレスト・コンクリート鋼棒)
PCV	: Primary Containment Vessel	(原子炉格納容器)
DRI	: Damage Risk Importance	(損傷リスク重要度)
PIRT	: Phenomena Identification and Ranking Table	(重要度ランク表)



## 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<sup>[I],[II]</sup>。

東北大学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<sup>[III]</sup>。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<sup>[IV]</sup>、この活動は東北大学が掲げるSDGs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<sup>[V]</sup>。

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(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、芝浦工業大学、東京工業大学、日本工業大学、木更津工業高等専門学校(以下、「木更津高専」という。)、大阪公立大学、岡山大学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年度に解決すべき課題

2年目となる令和4年度は、令和3年度に明確化した研究方法と研究の方向付けに従い、試験実施等本格的な研究を行うために整えられた諸準備に基づき、第5項で述べる実施内容を計画通り実施し、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。

## (4) 令和4年度の本研究の目的

令和4年度は、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する。

## (5) 令和4年度の研究の実施内容

令和4年度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)-1 動的応答・振動性状の観測

- ・ 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する。
- ・ 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する。

## 1)-2 動的応答・振動性状の評価（再委託先：岡山大学）

- ・ 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する。
- ・ 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）

- ・ 鉄筋コンクリート（Reinforced Concrete：以下、「RC」という。）壁試験体を用いた振動台実験を行い、加速度センサとジャイロセンサを用いて動的な変形性状を測定する。
- ・ RC壁試験体を用いた静的加力実験を行い、振動台実験との結果と比較することで、動的な変形性状測定の基礎技術を開発する。
- ・ 原子炉建屋を模した有限要素法（Finite Element Method：以下、「FEM」という。）モデルを作成し、センサの取り付け位置を選定するための基礎的な手法を開発する。

## 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）

- ・ 中性子イメージング技術で測定されたひび割れを有するRC試験体に対して、サブテラ/テラヘルツ波イメージングレーダを適用して得られる画像情報を補完処理し、検知精度を向上させる方法を検討する。
- ・ RC中に含まれる水分や鉄筋の腐食生成物に対してサブテラ/テラヘルツ波の反射率がどのように変化するか解析し、内部損傷の検出精度を高める。

## 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）

- ・ 構築している損傷測定システムを用いて、中性子イメージング技術で測定されたひび割れを有するRC試験体に対して、サブテラ/テラヘルツ波イメージングレーダで遠隔測定を実施する。
- ・ 従来から知られている腐食反応と分析化学手法との相関を補完するため、RC構造物内部の非接触検査に必要となる水分量や鉄筋の腐食状態を変化させた試験体に対してサブテラ/テラヘルツ波イメージング技術を適用し、その反射率を測定する。

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)

- ・ 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、研究用原子炉 3 号炉 (Japan Research Reactor No.3 : 以下、「JRR-3」という。) 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

- ・ 劣化 (模擬ひび割れ) を導入したコンクリート試験体 (令和3年度に作製済み) に対してサブテラ/テラヘルツ波イメージング技術による測定を行い、導入した劣化状態及びひび割れ応力曲線等の力学特性それぞれと測定結果の関係を整理し、キャリブレーション方法を検討する。
- ・ 上記の検討結果に基づき、下記③3) で実施する FEM 解析の条件を踏まえて劣化を導入したコンクリートの試験体を新たに作製し、サブテラ/テラヘルツ波イメージング技術によるひび割れ量の測定を行い、マクロな情報として測定結果を解釈するための方法を検討する。

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

- ・ 腐食グレード (内部ひび割れによる発生状況) の異なる RC 試験体 (令和3年度に作製済み) に対してサブテラ/テラヘルツ波イメージング技術による測定を行い、導入した腐食グレードと引き抜き時の力学特性 (一体性) との関係を整理する。
- ・ 鉄筋腐食に関連するコンクリートの含水率について、サブテラ/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。
- ・ 下記③3) で実施する FEM 解析の条件を踏まえて腐食グレードと含水率を変化させた RC の試験体を作製し、サブテラ/テラヘルツ波イメージング技術による鉄筋とコンクリートとの付着劣化特性の測定を行う。

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)

- ・ RC 造耐震壁に関する既往の実験研究を対象とした、3次元 FEM 解析を行い、構造特性及び破壊性状について実験結果との比較を通じて解析モデルの妥当性を検証する。
- ・ 耐震壁の損傷箇所及び損傷程度を任意に設定し、これらを変数としたパラメトリック解析を通して、部材の構造特性劣化に対しクリティカルな損傷条件を検討する。

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

- ・ 上記(5)①～(5)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、引き続き、検討すべき項目を抽出し、課題を整理する。
- ・ 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 (以下、「CLADS」という。) など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などを開催する。

## (6) 令和4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。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、次年度の研究が実施できる状況となった。

## (7) 令和5年度の見通し

前述のように、計画通り令和4年度の成果を挙げることができたので、令和5年度はこれまでの計画に基づき、下記を実施できる見込みである。

## 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

## 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。有限要素（Finite Element：以下、「FE」という。）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 の熱中性子ラジオグラフィ装置（Thermal Neutron Radiography Facility：以下、「TNRF」という。）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・剥離など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などを開催する。

令和 3 年度までの成果報告書：

JAEA-Review 2022-071

<https://doi.org/10.11484/jaea-review-2022-071>

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「1F 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)。

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。

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。

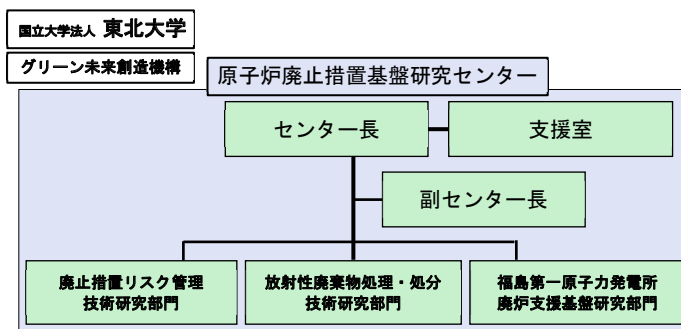


図 1-1 1F 廃炉支援基盤研究部門の位置付け

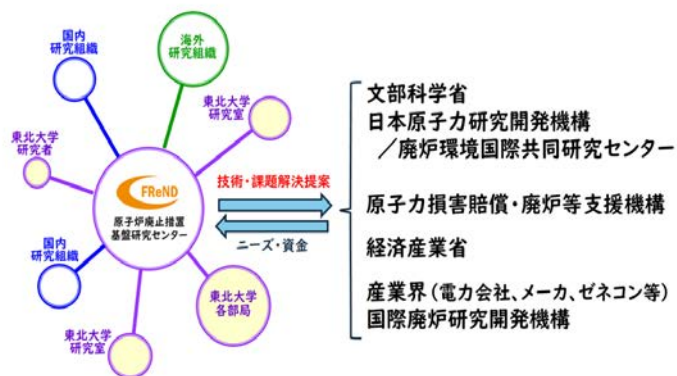


図 1-2 原子炉廃止措置基盤研究センターの研究連携ハブ機能

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た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 原子炉建屋の保安全管理を実施することを想定して、戦略的かつ効率的・効果的な保安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、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マ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個所、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個所を選定し、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	必要個所	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・ジャイロセンサを動方向の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

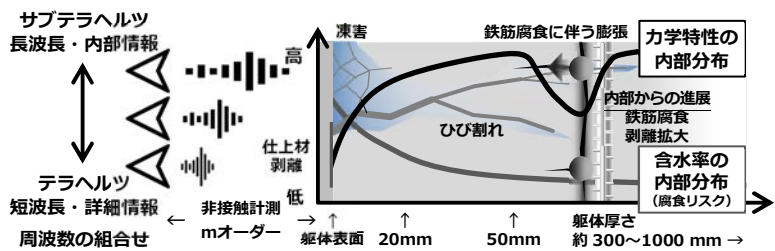
課題②-1：従来のコンクリート構造物の損傷調査である目視・打音検査、コアサンプリングに代り、電磁波をコンクリート躯体に照射して、その反射波から表面のみならず内部のひび割れや鉄筋腐食、水分の存在を検知する、これまでにない全く新しい非接触検査技術を開発する（表 2.1-2）。これは、異なる周波数レンジの電磁波を用いることで、探知するコンクリート躯体の領域の広さ、深さを調整し、サブテラヘルツ波による 1 次調査（大まかな損傷の有無）

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。



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）。

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 総合的な建屋安全性評価手法の開発と長期保全計画の提案

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。

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

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
鉄筋部材	地震のみ	イメージング・データの活用
建屋	無し	部材実験イメージング・データの活用



2.2 実施体制

本研究の実施体制を図 2.2-1 に示す。

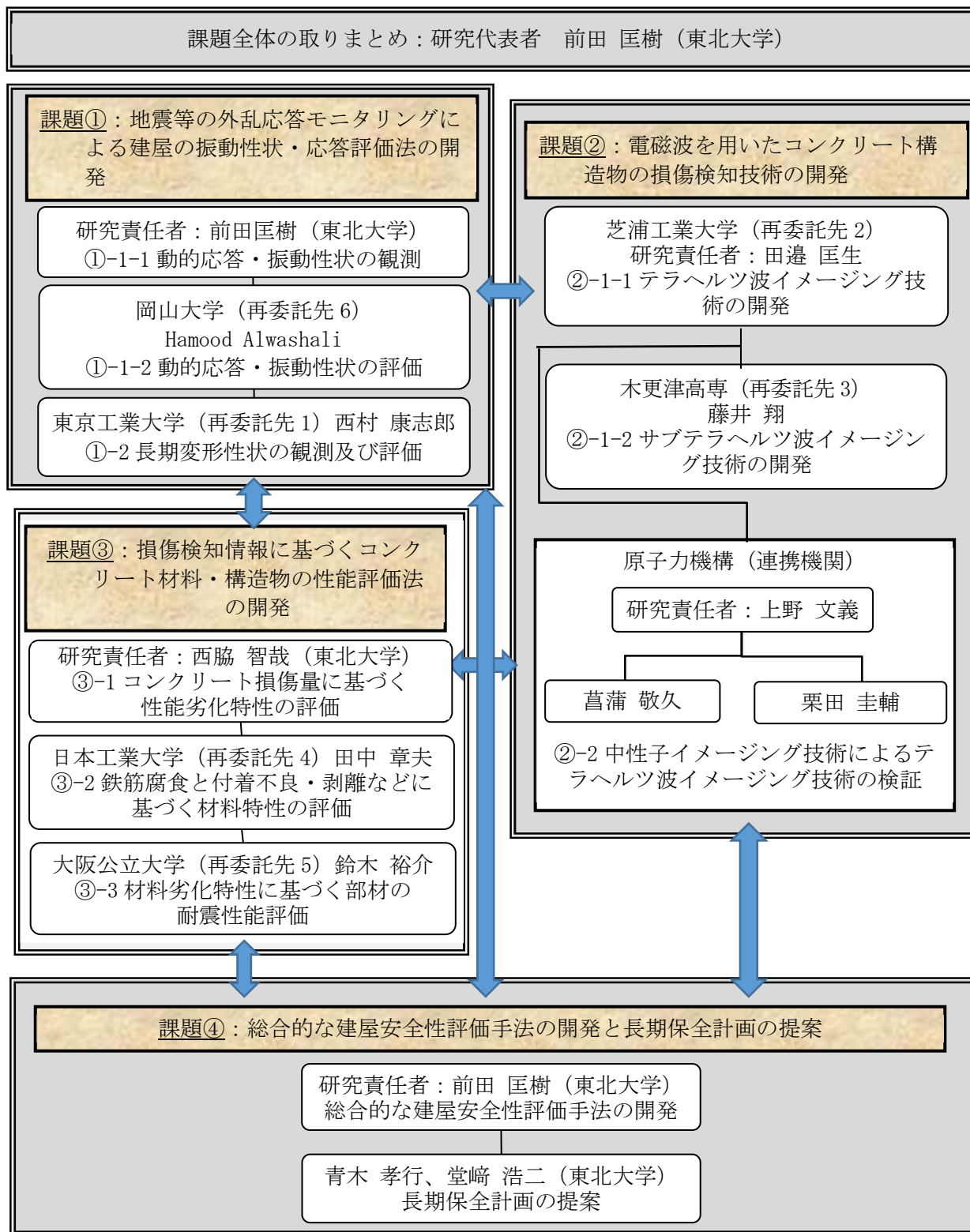


図 2.2-1 研究の実施体制

## 2.3 令和4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

##### ①-1 動的応答・振動性状の観測

- ・ 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する。
- ・ 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する。

##### ①-2 動的応答・振動性状の評価（再委託先：岡山大学）

- ・ 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する。
- ・ 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）

- ・ RC 壁試験体を用いた振動台実験を行い、加速度センサとジャイロセンサを用いて動的な変形性状を測定する。
- ・ RC 壁試験体を用いた静的加力実験を行い、振動台実験との結果と比較することで、動的な変形性状測定の基本技術を開発する。
- ・ 原子炉建屋を模した FEM モデルを作成し、センサの取付位置を選定するための基礎的な手法を開発する。

#### (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）

- ・ 中性子イメージング技術で測定されたひび割れを有する RC 試験体に対して、サブテラ/テラヘルツ波イメージングレーダを適用して得られる画像情報を補完処理し、検知精度を向上させる方法を検討する。
- ・ RC 中に含まれる水分や鉄筋の腐食生成物に対してサブテラ/テラヘルツ波の反射率がどのように変化するか解析し、内部損傷の検出精度を高める。

##### 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）

- ・ 構築している損傷測定システムを用いて、中性子イメージング技術で測定されたひび割れを有する RC 試験体に対して、サブテラ/テラヘルツ波イメージングレーダで遠隔測定を実施する。
- ・ 従来から知られている腐食反応と分析化学手法との相関を補完するため、RC 構造物内部の非接触検査に必要となる水分量や鉄筋の腐食状態を変化させた試験体に対してサブテラ/テラヘルツ波イメージング技術を適用し、その反射率を測定する。

##### 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）

- ・ 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する。

(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

① コンクリート損傷量に基づく性能劣化特性の評価

- ・ 劣化（模擬ひび割れ）を導入したコンクリート試験体（令和3年度に作製済み）に対してサブテラ/テラヘルツ波イメージング技術による測定を行い、導入した劣化状態及びひびみ応力曲線等の力学特性それぞれと測定結果の関係を整理し、キャリブレーション方法を検討する。
- ・ 上記の検討結果に基づき、下記(3)③で実施する FEM 解析の条件を踏まえて劣化を導入したコンクリートの試験体を新たに作製し、サブテラ/テラヘルツ波イメージング技術によるひび割れ量の測定を行い、マクロな情報として測定結果を解釈するための方法を検討する。

② 鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価

（再委託先：日本工業大学）

- ・ 腐食グレード（内部ひび割れによる発生状況）の異なる RC 試験体（令和3年度に作製済み）に対してサブテラ/テラヘルツ波イメージング技術による測定を行い、導入した腐食グレードと引抜時の力学特性（一体性）との関係を整理する。
- ・ 鉄筋腐食に関連するコンクリートの含水率について、サブテラ/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。
- ・ 下記(3)③で実施する FEM 解析の条件を踏まえて腐食グレードと含水率を変化させた RC の試験体を作製し、サブテラ/テラヘルツ波イメージング技術による鉄筋とコンクリートとの付着劣化特性の測定を行う。

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）

- ・ RC 造耐震壁に関する既往の実験研究を対象とした、3次元 FEM 解析を行い、構造特性及び破壊性状について実験結果との比較を通じて解析モデルの妥当性を検証する。
- ・ 耐震壁の損傷箇所及び損傷程度を任意に設定し、これらを変数としたパラメトリック解析を通して、部材の構造特性劣化に対しクリティカルな損傷条件を検討する。

(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

- ・ 上記(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、引き続き、検討すべき項目を抽出し、課題を整理する。
- ・ 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などを開催する。

2.3.2 令和4年度の研究スケジュール

令和4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4年度研究スケジュール

題目 令和4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)													
	縮小模型実験の試験により応答推定の検討									実験の観測データに基づく解析モデル修正検討			まとめ
②長期変形性状の観測及び評価 (東京工業大学)													
	計測システム開発のための部材実験の準備							部材実験			試験結果評価		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)													
	損傷イメージの画像情報取得				画像情報の理解と活用				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での模擬鉄筋コンクリートCT画像取得							模擬鉄筋コンクリートCT画像解析					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)													
	コンクリート試験体のサブテラヘルツ波による計測(小試験体)			劣化を導入したコンクリート試験体の作製と測定				試験結果評価				まとめ	
②鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価 (日本工業大学)													
	鉄筋コンクリート試験体のサブテラヘルツ波による計測(小試験体)			劣化鉄筋コンクリート試験体の作製と測定				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)													
	鉄筋コンクリート造耐震壁の3次元FEMモデルの検討			損傷箇所、損傷程度に応じた鉄筋コンクリート造耐震壁の構造特性評価				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)													
内容検討													まとめ
(5)研究推進													
各研究課題の連携調整											△全体会議		まとめ
△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4年度)

3.1.1 動的応答・振動性状の観測 (令和3年度～令和4年度)

【令和3年度までの実施内容及び成果 (概要)】

- ・ 東京電力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。
- ・ 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。
- ・ 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。

図 3.1.1-1 に示す通り、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、図 3.1.1-2 に示す通り、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。

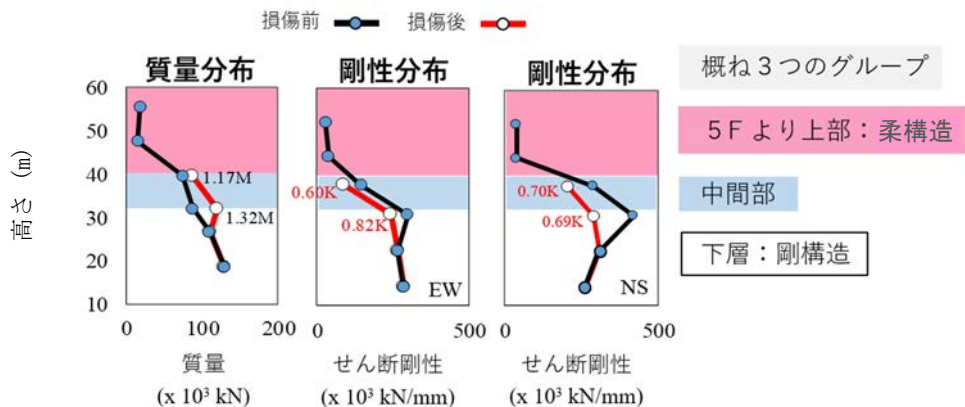


図 3.1.1-1 1F 建屋の損傷前と損傷後の解析モデルの質量・剛性分布の比較

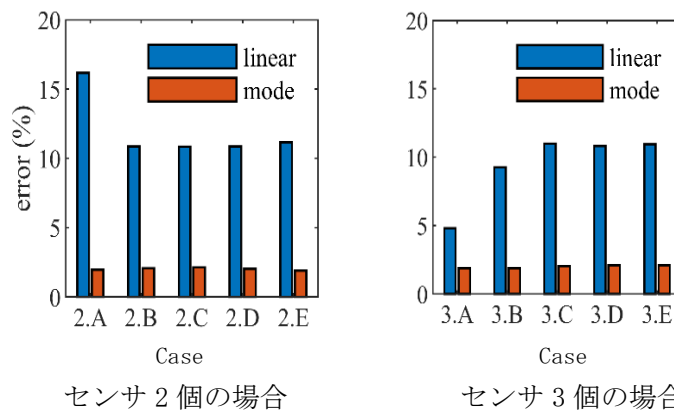


図 3.1.1-2 センサの位置を変えた場合の誤差の推定

【令和4年度実施内容及び成果】

(1) 振動実験の試験体と装置

小型建屋模型を用いた振動台実験を行い、地震応答と振動特性に関するデータを収集した。振動台は、米国 Quanser 製・一方向振動台 Shake Table II（最大加速度 2.5 g、全ストローク±75 mm）を使用した。小型建屋模型試験体は、アルミニウム板の柱及び床を鋼製アングルで組み立てた 1 層試験体で、屋根床には、鋼製板を付加して、試験体の質量を調整した。

図 3.1.1-3 に示すように、振動台を木製の台に固定し、振動台に試験体を固定した。試験体の基礎床及び屋根床には加速度計（株式会社東京測器研究所製・ARS-10）を設置して応答加速度を、木製床に固定したレーザー変位計（株式会社キーエンス製・LK-H150）により応答変形を計測した。

試験体は、柱の本数、高さ、質量を変化させた A1、A2、A3 の 3 種類を用意した。表 3.1.1-1 に示すように、試験体の特性は以下の通りである。

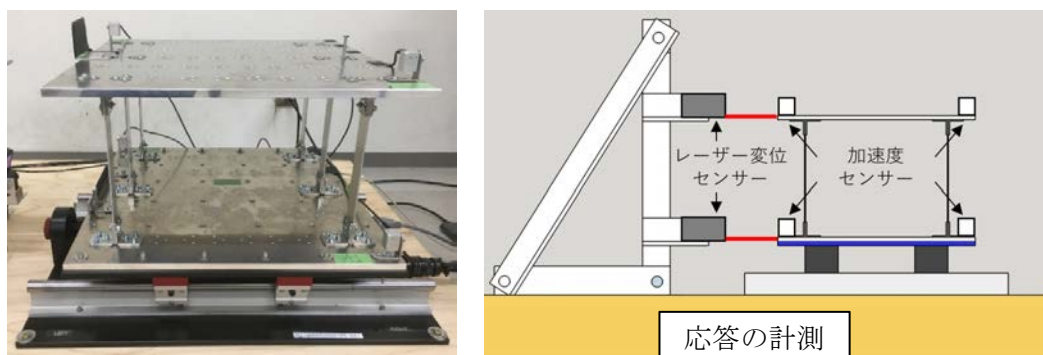


図 3.1.1-3 振動実験の試験体及び応答の計測

表 3.1.1-1 試験体の特性

試験体	柱数	試験体の高さ (mm)	質量 (kg)	周期 (s)
A1	6	165	5~15	0.10~0.16
A2	4	165	10~30	0.17~0.29
A3	4	215	7~25	0.21~0.40

(2) 自由振動実験による試験体の構造特性の評価

振動実験の実施前に、図 3.1.1-4 に示すように試験体に静荷重を作用させ、水平剛性を計測した。屋根床にばね秤を介して水平力を作用させ、水平力  $P$  と変位  $\delta$  を計測した。水平剛性  $K$  の計測結果は、表 3.1.1-2 に示すように、計算値より 5 %程度大きかった。なお、水平剛性の計算値は、以下の式で求めた。

$$K = 12EI/h^3 \quad \text{式(3.1.1-1)}$$

$E$ : ヤング係数 ( $67 \times 10^4$  kN/mm<sup>2</sup>)

$I$ : アルミ柱の断面 2 次モーメント (1 本分) ( $20$  mm<sup>4</sup>)

$h$ : 試験体の高さ (165 mm、215 mm)

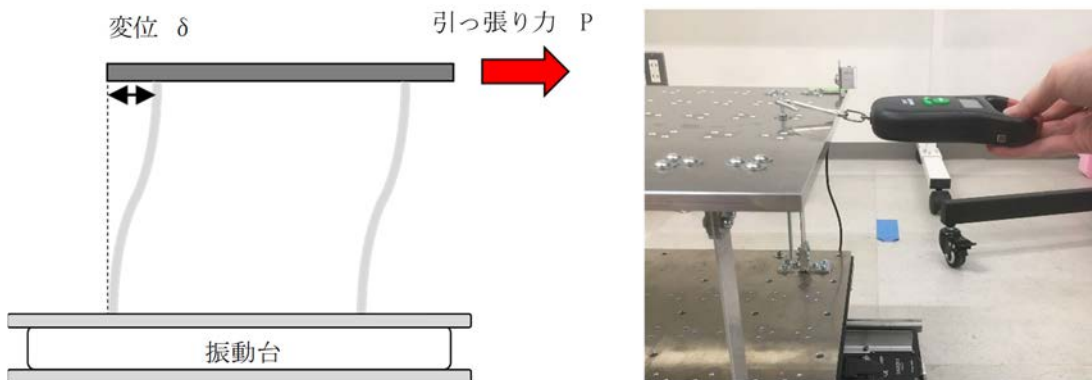


図 3.1.1-4 静荷重実験による水平荷重の測定

表 3.1.1-2 試験体 A1 の水平剛性の実験値と計算値

回	荷重 P (N)	水平変位 δ (mm)	水平剛性		
			実験値 (N/mm)	実験値の平均 (N/mm)	計算値 (N/mm)
1	10.3	0.446	23.1	22.7	21.5
2	10.0	0.448	22.3		
3	10.1	0.443	22.8		

次に、自由振動実験により、試験体の減衰係数を計測した。静荷重試験と同様に、試験体にばね秤で水平変形を生じさせた後に解放し、自由振動による応答を計測した。自由振動実験による応答の時刻歴を図 3.1.1-5 に、時刻歴の変位応答の振幅比から式 (3.1.1-2) により求めた減衰定数  $h^{[3.1.1-1]}$  を図 3.1.1-6 に示す。最初の 20 サイクルの変位応答から求めた減衰定数は  $h = 0.5\%$  でほぼ一定であった。

$$h = \ln a / 2\pi \tag{3.1.1-2}$$

a : 振幅比 =  $x_{i+1}/x_i$

$x_i, x_{i+1}$  : それぞれ  $i$  サイクル、 $i+1$  サイクルの振幅

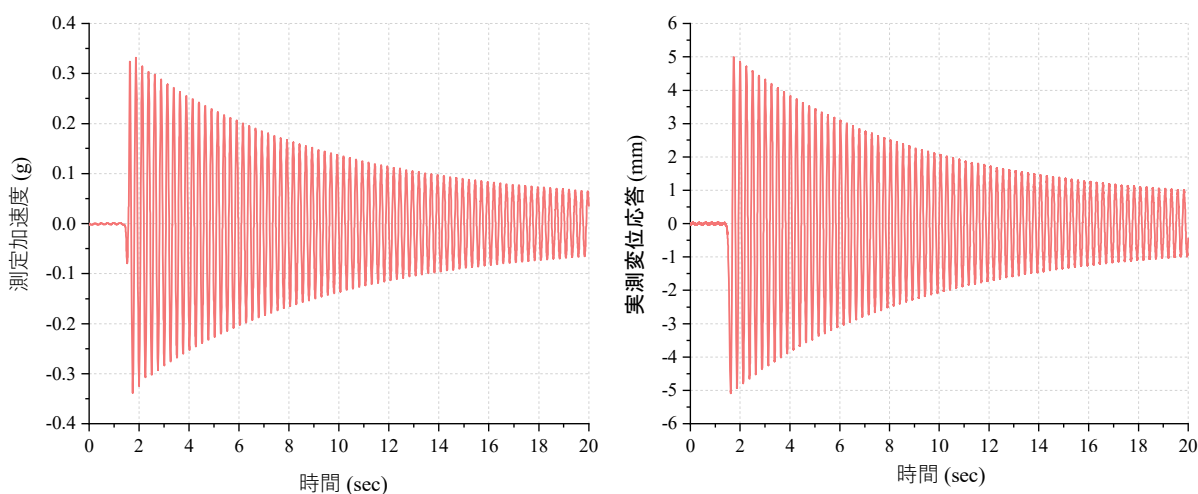


図 3.1.1-5 自由振動実験による応答の時刻歴

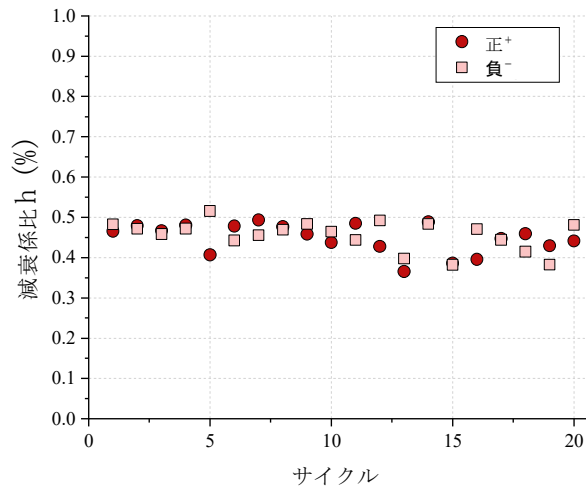


図 3. 1. 1-6 自由振動実験による減衰比の推定

また、変位応答のフーリエ変換によるフーリエ振幅を図 3. 1. 1-7 に示す。これによる卓越周波数から求めた振動周期  $T$  と、試験体の質量  $m$ 、水平剛性  $K$  から求めた振動周期はほぼ一致した。

試験体 A1、A2、A3 のそれぞれで、おもりの付加重量を変化させることで、振動周期  $T$  を変化させて、自由振動実験を行った。図 3. 1. 1-8(a)に示すように、試験体の振動周期  $T$  は 0.1 (s) ~0.4 (s) の範囲で変化させ、同図(b)に示すように、自由振動実験の結果、振動周期の実測値は、計算値と平均値 0.99、変動係数 0.01 と極めて良い精度で一致した。

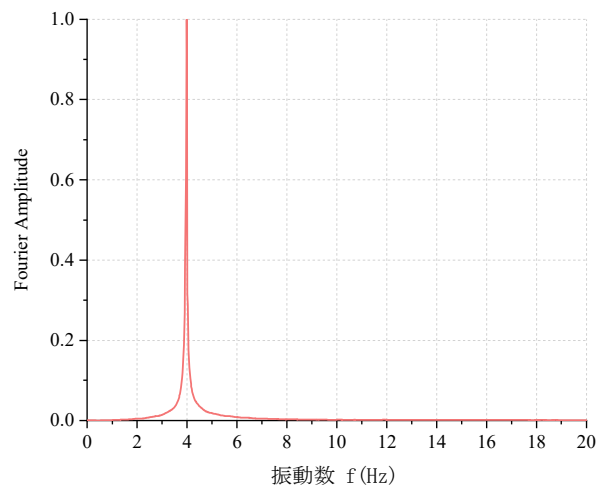
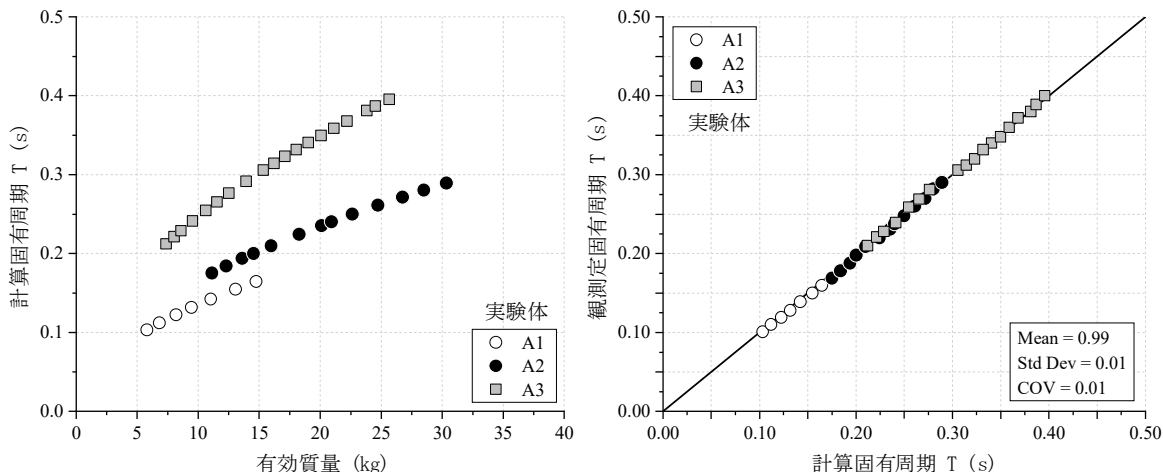


図 3. 1. 1-7 フーリエ変換



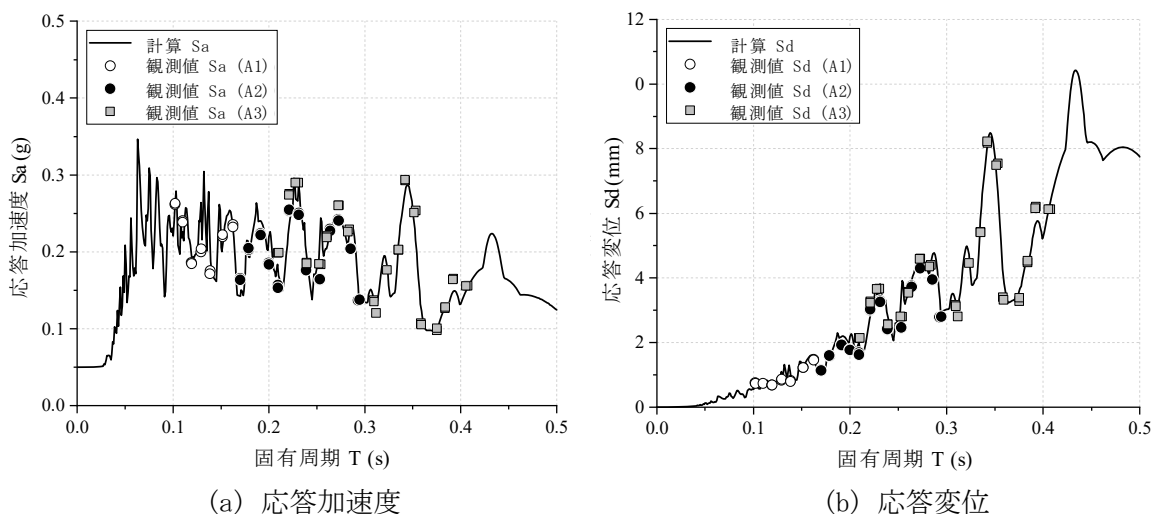


(a) 質量を変化させた試験体の固有周期 (b) 固有周期の計算値と実測値  
 図 3. 1. 1-8 質量を変化させた自由振動実験による固有周期 T

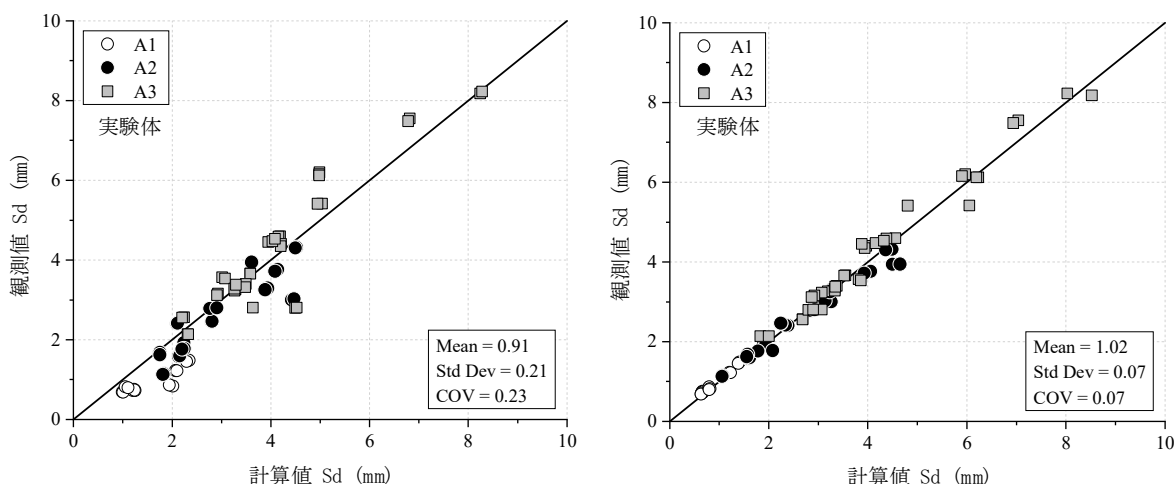
(3) 地震波入力実験による試験体の振動性状

自由振動実験で、構造特性が把握できた 1 層小型建屋試験体（振動周期  $T = 0.1 \sim 0.4$  s）に対して、振動台を用いて地震波を入力した振動実験を行い、応答性状を計測し、計算値と比較した。入力地震波には、1940 年 Imperial Valley 地震の El\_Centro NS 波<sup>[3.1.1-2]</sup>を用い、小型試験体であることから最大地動加速度を 0.05 g に基準化し、時間スケールを 1/2 倍に縮小した。

加振は各試験体 2 回行い、応答変位、応答加速度、振動周期  $T$  を計測した。同一試験体の 2 回の振動実験の応答値の差は 5 % 以下で安定した結果が得られた。各試験体の最大応答変位及び最大応答加速度と、応答スペクトル  $S_d$  及び  $S_a$ <sup>[3.1.1-3], [3.1.1-4]</sup> の比較を図 3. 1. 1-9 に示す。計測された最大応答は、応答スペクトルに基づく推定値と概ね一致している。最大応答変位の観測値と計算値の比較を図 3. 1. 1-10 に示す。同図(a)に示すように、固有周期を観測値として応答スペクトルから求めた場合、最大応答の計算値は、観測値を過大評価（観測／計算の平均値 0.91、変動係数 0.23）するのに対して、固有周期の計算値に基づく場合は、観測値を概ねよく評価できた（観測／計算の平均値 1.02、変動係数 0.07）。



(a) 応答加速度 (b) 応答変位  
 図 3. 1. 1-9 最大応答の観測値と応答スペクトルの比較



(a) 固有周期の観測値を用いる場合 (b) 固有周期の計算値に基づく場合  
 図 3.1.1-10 最大応答変位の観測値と計算値の比較

上記のように、固有周期の観測値を用いると応答変位の推定誤差が大きくなるのは、試験体が減衰定数  $h = 0.5\%$  と減衰が極めて小さく、わずかな振動周期の変化により最大応答が変動することが一因である。そこで、この影響を軽減するために、応答スペクトルの平滑化 (Smoothing) による推定法を検討した。これは、減衰定数  $h$  が大きくなるにつれて応答スペクトルの形状が平滑化する傾向を利用して、減衰定数  $h$  が小さい場合の応答スペクトルを推定するという発想である。本研究では、減衰定数  $h = 2\%$  の応答スペクトルを平均的に  $h = 0.5\%$  の応答スペクトルに一致するように係数倍することで平滑化する。具体的には、以下の式(3.1.1-3)、式(3.1.1-4)、式(3.1.1-5)、式(3.1.1-6)により求める。

$$Sa_{sm} = F_{Sa} \times Sa_{h=2\%} \tag{3.1.1-3}$$

$$Sd_{sm} = F_{Sd} \times Sd_{h=2\%} \tag{3.1.1-4}$$

$Sa_{sm}$ 、 $Sd_{sm}$  : 平滑化した加速度応答スペクトル、変位応答スペクトル ( $h = 0.5\%$ )

$Sa_{h=2\%}$ 、 $Sd_{h=2\%}$  : 加速度応答スペクトル、変位応答スペクトル ( $h = 2\%$ )

$F_{Sa}$ 、 $F_{Sd}$  : 平滑化スペクトルの加速度倍率、変位倍率

$$F_{Sa} = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{Sa_{0.5}(Ti)}{Sa_2(Ti)} \text{ for } 0.01 \text{ s} < T < 0.50 \text{ s} \tag{3.1.1-5}$$

$$F_{Sd} = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{Sd_{0.5}(Ti)}{Sd_2(Ti)} \text{ for } 0.01 \text{ s} < T < 0.50 \text{ s} \tag{3.1.1-6}$$

$Sa_{h=0.5\%}$ 、 $Sd_{h=0.5\%}$  : 加速度応答スペクトル、変位応答スペクトル ( $h = 0.5\%$ )

平滑化した変位応答スペクトルと、それに基づく応答変位の計算値と観測値の比較を図 3.1.1-11 に示す。平滑化した応答スペクトルを用いると、応答変位の推定は、(観測／計算の平均値 0.98、変動係数 0.13) と、精度が向上することが分かった。

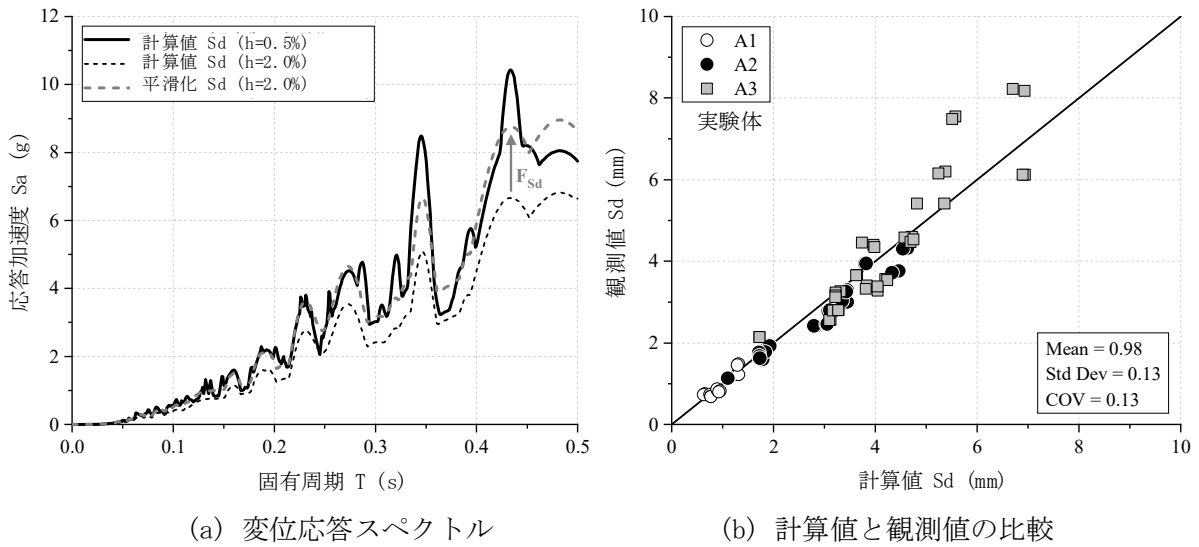


図 3.1.1-11 平滑化した変位応答スペクトル

(4) 損傷を想定して構造特性を変化させた試験体による振動実験

建屋に損傷が生じて、剛性低下して振動周期が長周期化したり、塑性化による履歴エネルギー吸収により、等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  が増加した場合を想定して、様々な振動周期の試験体にダンパーを取り付けて、減衰定数  $h$  を変化させて振動実験を行った。試験体（固有周期  $T = 0.25$  s）とダンパーの設置状況を図 3.1.1-12 に示す。ダンパーとして、株式会社東京測器研究所製・変位計 CDP50 及び不二ラテックス株式会社製・FDP-1060A2 を使用し、表 3.1.1-3 に示すように、目標とする減衰定数  $h$  に合わせて、3 種類のダンパーを配置した。

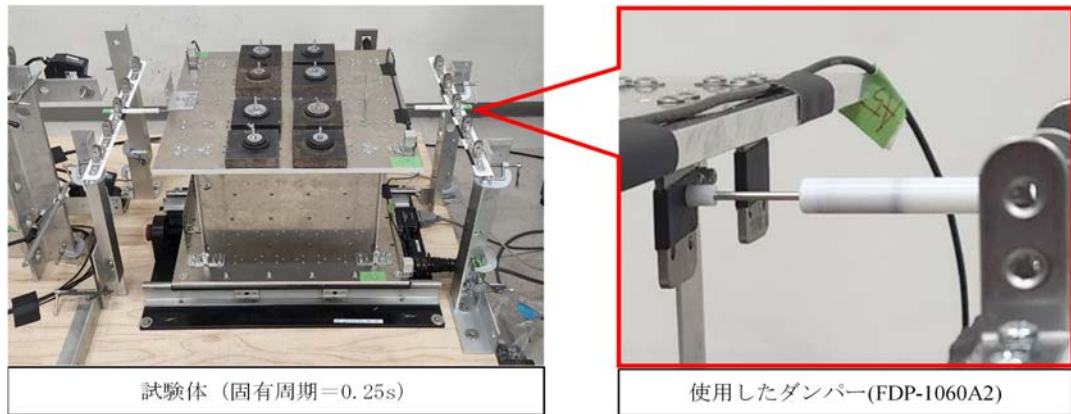


図 3.1.1-12 ダンパーを設置した試験体

表 3.1.1-3 材料ダンパーと減衰推定

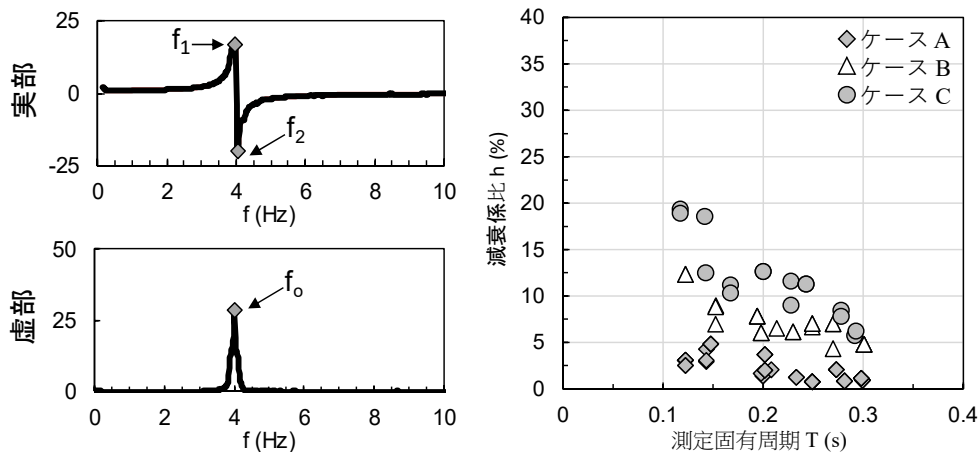
ケース	目標減衰定数 $h$	ダンパー		実際の減衰定数 $h$
		製品	個数	
A	2 %	東京測器研究所製 CDP-50	2	1~5 %
B	5 %	東京測器研究所製 CDP-50	4	4~12 %
C	10 %	不二ラテックス製・樹脂ダンパー FDP-1060A2	1	6~20 %

周期の異なる試験体に上記 3 水準のダンパーを設置して、地震波加振試験を実施した。観測した応答加速度のフーリエスペクトルに基づいて、周波数応答関数 (Frequency Response Function: 以下、「FRF」という。) 法により減衰定数  $h$  を推定した<sup>[3.1.1-5], [3.1.1-6]</sup>。図 3.1.1-13(a) に示す FRF の実部と虚部を用いて、減衰定数  $h$  を式 (3.1.1-7) により求めた。

$$h = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \tag{式 (3.1.1-7)}$$

$f_0$ : 固有振動数、FRF の虚部のピーク振動数  
 $f_1$ : FRF の実部+側ピーク振動数  
 $f_2$ : FRF の実部-側ピーク振動数

図 3.1.1-13(b) に示すように、各試験体の減衰定数  $h$  は、各試験体の質量  $m$ ・剛性  $k$  により影響を受け変化するが、ケース A では  $h = 0.5 \sim 5 \%$ 、ケース B で  $h = 4 \sim 10 \%$ 、ケース C で  $h = 12 \sim 20 \%$  程度となり、概ね目標とする減衰性能を付加することができた。



(a) 周波数応答関数のピーク振動数 (b) 同定された減衰定数  $h$

図 3.1.1-13 周波数応答関数 (FRF) 法による減衰定数  $h$  の同定

振動実験による応答変位の実測値と応答スペクトルを図 3.1.1-14 に、応答加速度の実測値と応答スペクトルを図 3.1.1-15 に示す。図は、左から順にケース A、ケース B、ケース C である。観測された応答変位と応答加速度は、概ね目標減衰定数  $h$  の上限 (max) と下限 (min) の応答スペクトルの間に入っており、図 3.1.1-16 及び図 3.1.1-17 に示すように、いずれのケースでも、観測値/計算値の平均は 1 前後、変動係数が十数%、良い精度で推定できることが分かった。

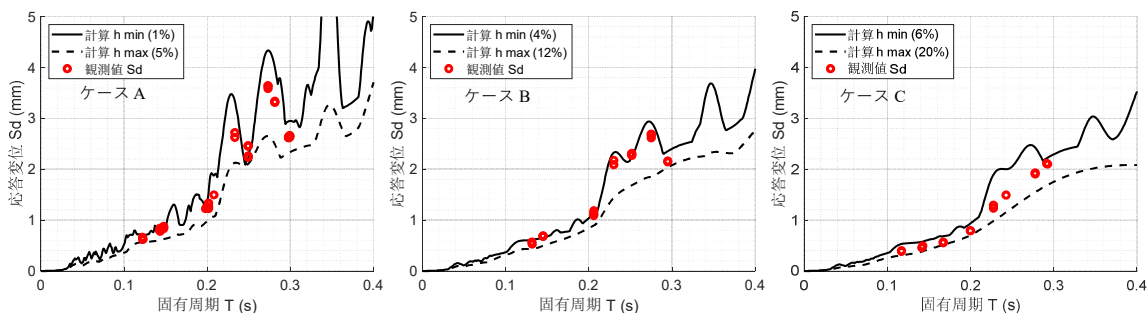


図 3.1.1-14 変位応答スペクトルと減衰を付加した試験体の応答変位

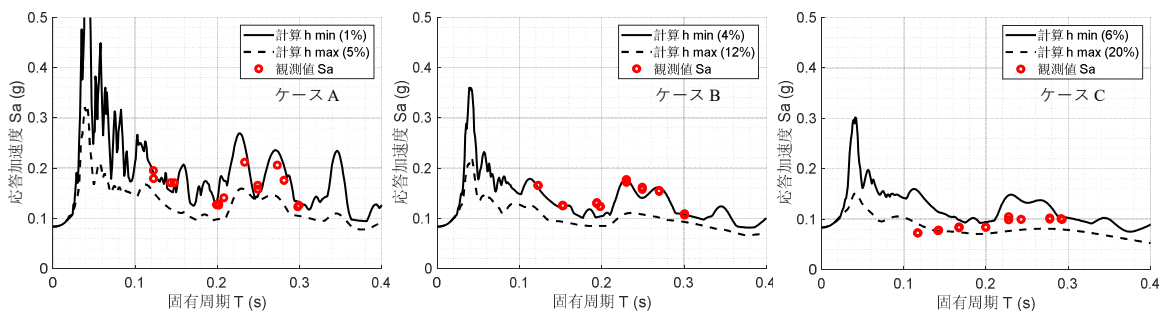


図 3. 1. 1-15 加速度応答スペクトルと減衰を付加した試験体の応答加速度

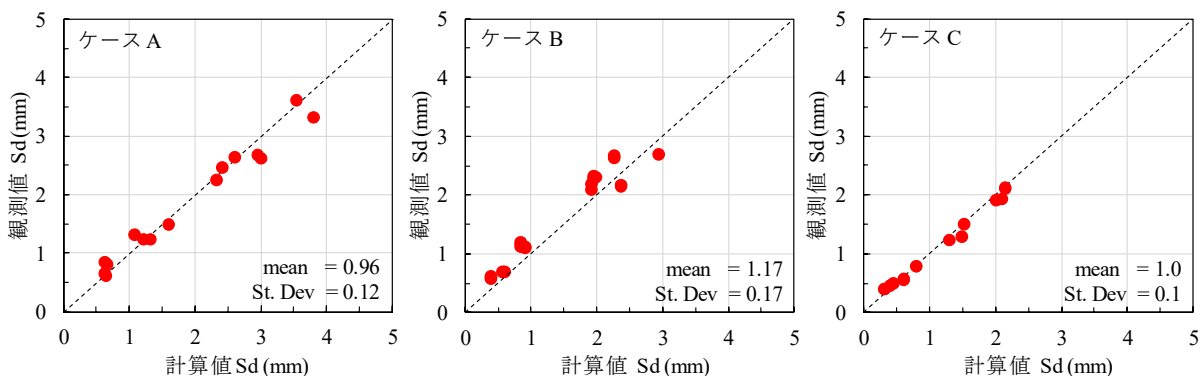


図 3. 1. 1-16 減衰を付加した試験体の応答変位の計算値と観測値の比較

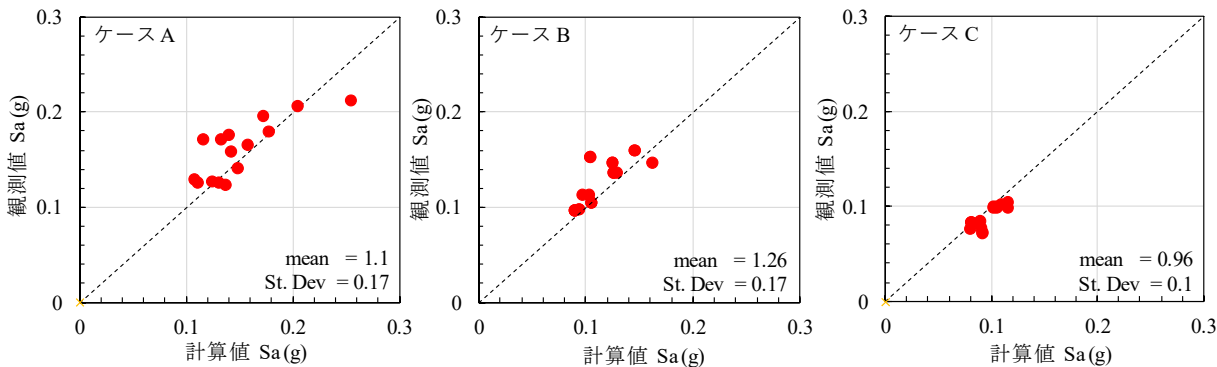


図 3. 1. 1-17 減衰を付加した試験体の応答加速度の計算値と観測値の比較

3.1.2 動的応答・振動性状の評価（再委託先：岡山大学）（令和4年度）

【令和4年度実施内容及び成果】

(1) 評価法の概要

建物内に設置した加速度計の観測値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 3.1.2-1 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地震動による応答の推定、さらに、③応答変形に基づいて被災度の推定をする。これら 3 つの方法の提案を行い、提案した方法を既往の RC 造 4 層架構縮小試験体の振動台実験の結果に適用することで、妥当性の検討を行った。

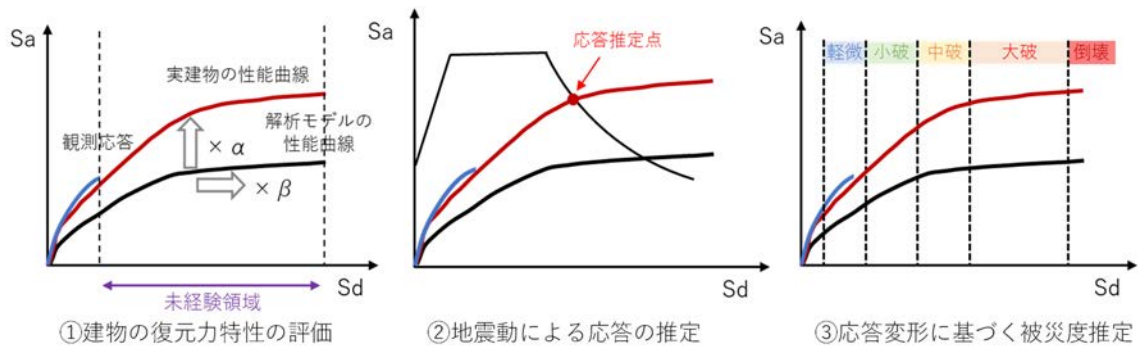


図 3.1.2-1 研究の概念図

(2) 検討対象とする既往の振動実験の概要

本研究で検討に用いるのは、2019 年に大林組・東北大学の共同実験として行われた、RC 造 4 層架構縮小試験体の振動台実験<sup>[3.1.2-1], [3.1.2-2]</sup>である。試験体は図 3.1.2-2 に示す連層耐震壁を有する架構で、梁曲げ降伏型の全体崩壊形を形成するように設計されている。入力地震動は、建築基準法限界耐力計算法告示の第 2 種地盤の応答スペクトル（減衰係数  $h = 5\%$ 、位相は 1995 年阪神淡路大震災の気象庁神戸記録。）を有する人工地震動とした。表 3.1.2-1 に示すように、入力倍率を漸増させて目標応答変形を生じさせるように、Run. 1～Run. 9 の加振が行われた。その他、実験の詳細については文献<sup>[3.1.2-1]</sup>、文献<sup>[3.1.2-2]</sup>を参考にされたい。

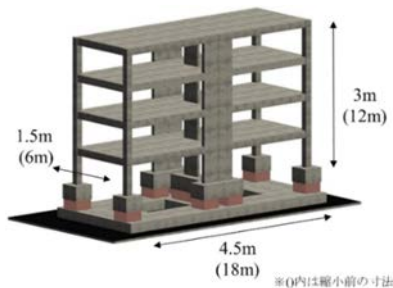


図 3.1.2-2 試験体モデル

表 3.1.2-1 入力地震波・加振ケース

加振波	加速度スペクトル	位相	入力倍率(%)	
			長辺方向	短辺方向
Run.1	告示波 2 種地盤	JMA神戸	20	20
Run.2			80	60
Run.3			160	100
Run.4			240	150
Run.5			260	170
Run.6			130	100
Run.7			220	120
Run.8			220	—
Run.9			260	—

本検討では実験結果の長辺方向を対象とした。図 3.1.2-3 に実験結果及び解析結果<sup>[3.1.2-3]</sup>の性能曲線を示す。実験で観測された性能曲線については Run. 1~5 と Run. 9 の最大応答点を結び、解析の性能曲線については文献<sup>[3.1.2-3]</sup>による静的増分解析結果を等価 1 自由度系に縮約することで求めた。実験では、Run. 3 で一部の部材の曲げ降伏が生じ始め、Run. 4 で概ね曲げ降伏型の崩壊形を形成した。その後、Run. 5 において 1 層で耐震壁が曲げ破壊したが柱・梁架構は耐力を維持し、最終的に Run. 9 で最大応答変形に達した。日本建築防災協会の被災度区分判定基準<sup>[3.1.2-4]</sup>に基づいた実験時各 Run の被災度は、図 3.1.2-4 に示す通りである。

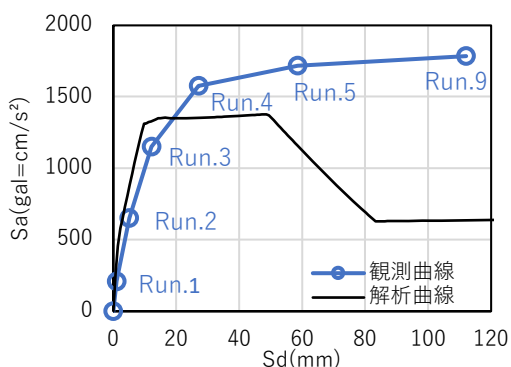


図 3.1.2-3 実験結果及び解析結果の性能曲線

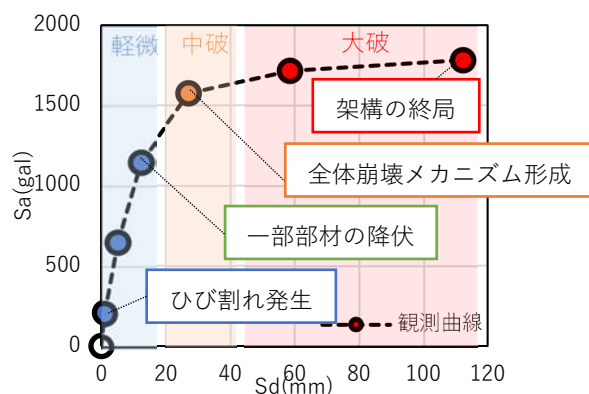


図 3.1.2-4 実験の被災度区分判定

### (3) 建物の復元力特性の評価（性能曲線の補正）

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、2 種類の補正方法を提案する。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（以下、「特性点フィッティング法」という。）である。

性能曲線の補正の際には、構造ヘルスマモニタリングの観点から、建物が経験し得る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応答の応答を精度良く推定できるようにしたい。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する。

#### ① 係数倍法

係数倍法では、図 3.1.2-5 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、縦横方向に拡張した形で与えられる」<sup>[3.1.2-5]</sup>ことを前提としている。最大応答加速度  $S_a$  及び最大応答変位  $S_d$  の補正係数をそれぞれ  $\alpha$ 、 $\beta$  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 3.1.2-6 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  $\delta_i$  とし、各観測点における  $\delta_i$  の 2 乗和を平均して、式(3.1.2-1)により平均誤差  $\Delta$  を求めた。なお、計算の際には、 $S_a$ 、 $S_d$  と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  $\Delta$  が最小となる係数  $\alpha$ 、 $\beta$  で補正を行う最適補正法、平均誤差  $\Delta$  が小さくなる係数  $\alpha$ 、 $\beta$  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。

$$\text{平均誤差 } \Delta = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n}} \quad \text{式(3.1.2-1)}$$

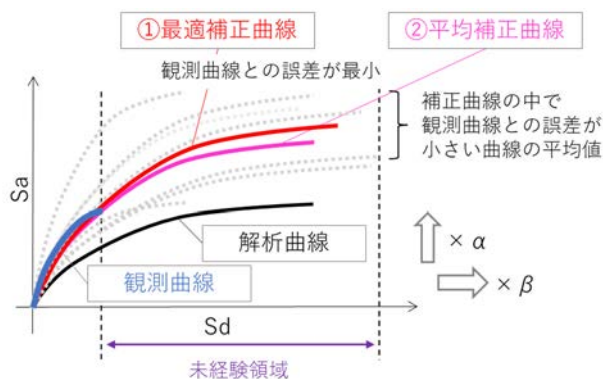


図 3.1.2-5 補正曲線概念図

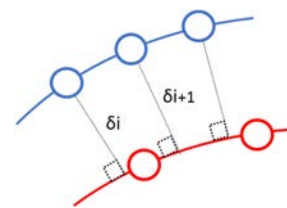


図 3.1.2-6 誤差の求め方

補正に用いる観測記録を Run. 1 終了～Run. 9 終了までと変化させて、係数倍法で補正した結果を図 3.1.2-7 に示す。補正に用いる観測曲線上の点（データ）を小変形領域から大変形領域で等間隔とするために、観測により得られた各 Run のピーク点を直線で結び、その間を線形補間した上で 1 mm ごとに点を選び誤差の計算を行った<sup>[3.1.2-6]</sup>。縦方向・横方向それぞれの補正係数  $\alpha$  及び  $\beta$  の検討範囲は 0.33 以上 3.00 以下で 0.01 刻みとし、観測曲線と補正曲線の平均誤差  $\Delta$  が最小となる  $\alpha$ 、 $\beta$  の組み合わせを求めた。

補正の結果、降伏による剛性低下が始まる前である Run. 3 までの記録で補正すると、応答加速度を過小に評価していた。Run. 1、Run. 2 までの記録による補正は比較的良いが、偶然の可能性を排除できず、弾性範囲（Run. 3 まで）のデータのみを使用する場合には、未経験領域の応答を十分な精度で推定することは難しい結果となった。一方、降伏点付近（Run. 4）の記録を使用し始めると、比較的精度良く性能曲線を補正できた。すべてのデータを使用した場合には、補正により、最大応答をほぼ正確に捉えることができた。



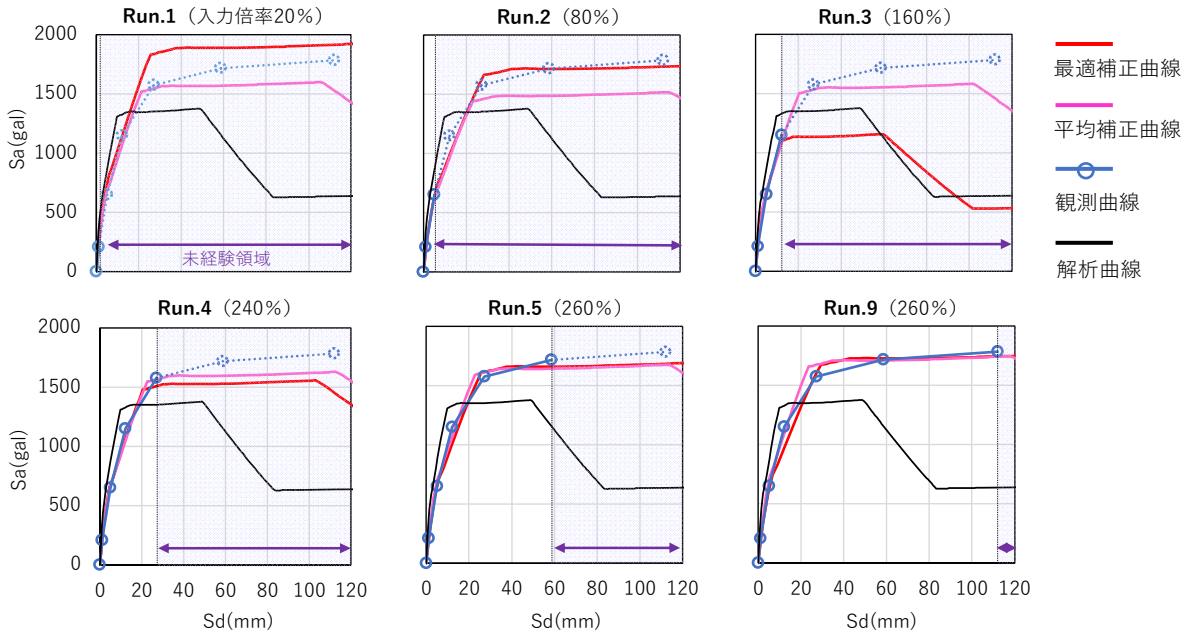


図3. 1. 2-7 最適補正曲線と平均補正曲線

1) 補正曲線の精度の検討

最適補正曲線と平均補正曲線の平均誤差の推移を図 3. 1. 2-8、図 3. 1. 2-9 に示す。図 3. 1. 2-8 は観測記録を使用して補正した範囲の誤差で、図 3. 1. 2-9 は観測記録のない未経験領域を含む性能曲線全体の誤差を示している。観測記録を使用した範囲では最大値の 3 %程度以下の誤差と、精度良く性能曲線を補正できていることが分かる。一方、補正のために使用できる観測記録がない未経験領域まで含めると推定精度は悪化するが、平均補正法では弾性範囲の Run. 1~3 の観測記録のみで補正しても最大応答の 10 %程度以下の平均誤差で性能曲線を安定して推定できており、実用的な応答推定に使用することも可能と考えられる。

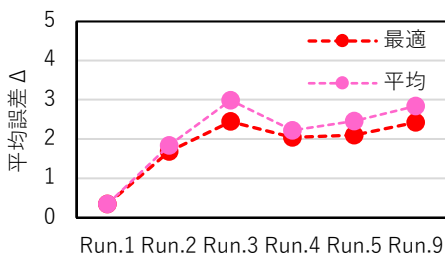


図 3. 1. 2-8 平均誤差の推移 (経験領域)

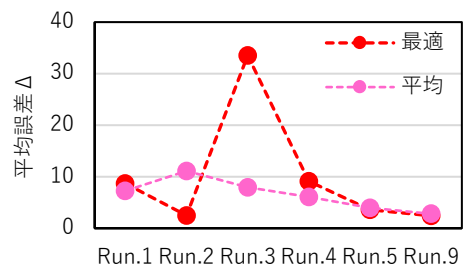
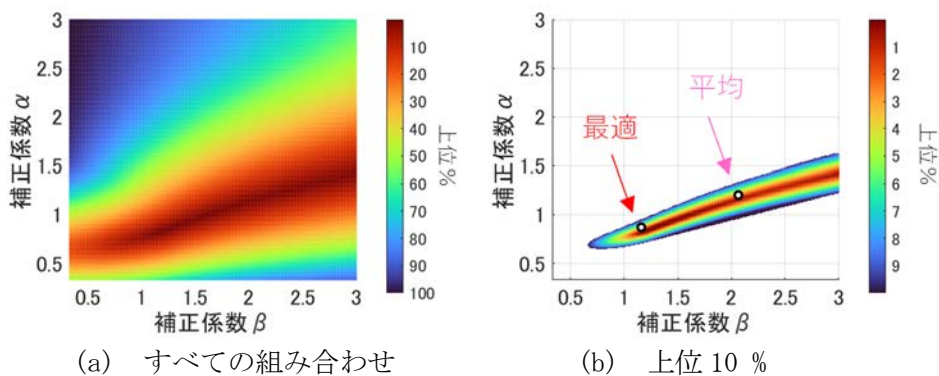


図 3. 1. 2-9 平均誤差の推移 (未経験領域を含む性能曲線全体)

2) 補正係数の分布

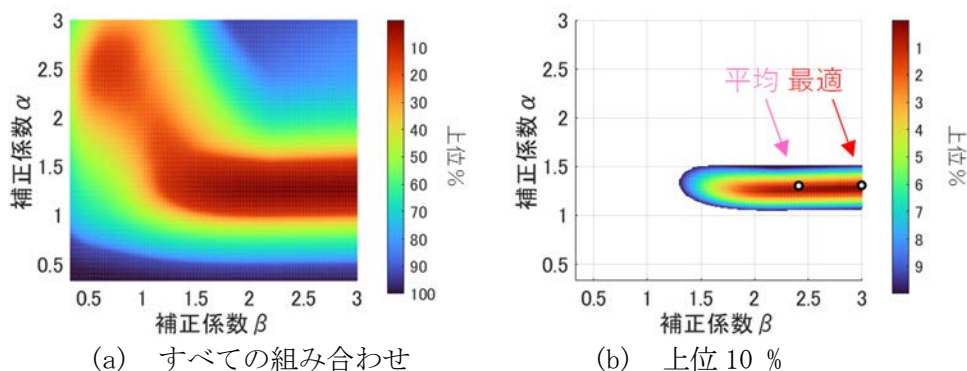
平均誤差  $\Delta$  の小さい上位の補正係数  $\alpha$ 、 $\beta$  の分布を図 3. 1. 2-10、図 3. 1. 2-11 に示す。弾性範囲のみの記録を使用する場合と塑性範囲の記録を使用する場合で大きく 2 つの傾向が見られた。よって、本検討では弾性範囲内である Run. 3 までを使用した場合とすべての記録 Run. 9 までを使用した場合の 2 つを例として示すこととする。

図 3.1.2-10 より、降伏点に達していない弾性範囲の記録のみを使用する場合には、弾性剛性（グラフの傾き）が一致する組み合わせが精度が良いと判定され、 $\alpha$  と  $\beta$  の比が一定である組み合わせが上位として直線上に広く検出されている。よって、この場合においては、最適補正係数が必ずしも未経験領域の曲線についても精度良く補正できるとは限らず、上位数%を考慮する平均補正係数の方が安定して補正できる結果になると考えられる。



(a) すべての組み合わせ (b) 上位 10 %  
 図 3.1.2-10 Run. 3 までの観測記録による補正係数の分布

図 3.1.2-11 より、塑性範囲の記録も使用する場合には降伏点があることで耐力が定まるため、 $\alpha$  の値はほぼ 1 つの値に収束する。一方で  $\beta$  についてはややばらつきが見られるが、図 3.1.2-10 に比べるとその範囲は小さいことから、塑性範囲の記録が得られている場合には、最適補正係数で十分に精度良く補正ができると考えられる。



(a) すべての組み合わせ (b) 上位 10 %  
 図 3.1.2-11 Run. 9 までの観測記録による補正係数の分布

以上を踏まえて、観測記録が弾性範囲のみの場合には平均補正法、観測記録が塑性範囲まで得られている場合には最適補正法を使用して補正することで、比較的精度良く解析曲線の補正ができると考えられる。

② 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、終局点などの構造的な特性点を同定し、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。

## 1) 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（図 3.1.2-12①緑線：以下、「カルマン曲線」という。）<sup>[3.1.2-7], [3.1.2-8]</sup>を用いてスムージングを行う。

## 2) 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 3.1.2-12②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 3.1.2-12②のように剛性変化率は上に凸になる。よって本研究では、それらを図 3.1.2-12 のように特性点として定義することとする。

## 3) 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  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  を求め、得られた  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  を用いて解析曲線を係数倍し補正する。

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。ただし、最大でも4つの点を基準にして補正するため、観測データが増えてもその間に新たな特性点を検出できなければ補正を更新することはできない。

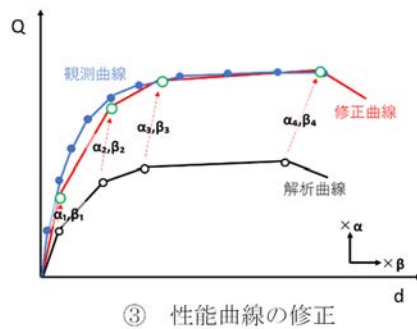
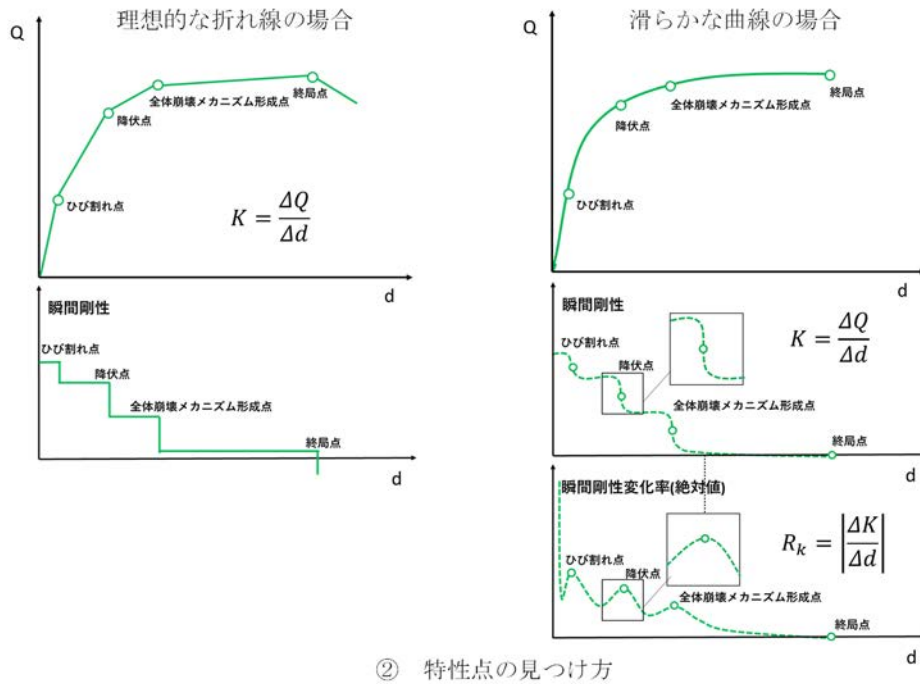
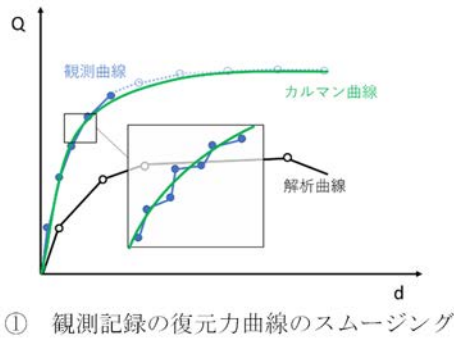


図3.1.2-12 特性点フィッティング法の概念図

特性点フィッティング法により各 Run 終了後に補正した結果を図 3.1.2-13 に示す。Run. 3 までのデータを用いるとはじめて特性点（ひび割れ点）が同定され、Run. 4 までで第2特性点（降伏点）、Run. 5 までで第3特性点（全体崩壊メカニズム形成点）が検出された。観測記録が限られている際に検出されない特性点（例えば、Run. 4 までの記録を用いる場合の第3特性点、第4特性点）の補正係数は、同定された範囲の  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  の平均値を乗じることで補正を行った。補正の結果、Run. 3 までの観測記録による推定でも大変形時までの性能曲線のある程度精度良く補正できた。しかし限られた4つの特性

点を基準にして補正するため、観測データが増えても新たな特性点を検出できなければその間の補正結果は変わらず、例えば Run. 5、Run. 9 終了時点の補正結果は同じとなった。本実験結果は、最終の Run. 9 加振でも耐力低下が生じなかったため第 4 特性点（終局点）は検出されなかった。よって、第 3 特性点までの補正係数  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  の平均値で第 4 特性点を補正するため、最大応答をやや小さく評価する結果となった。

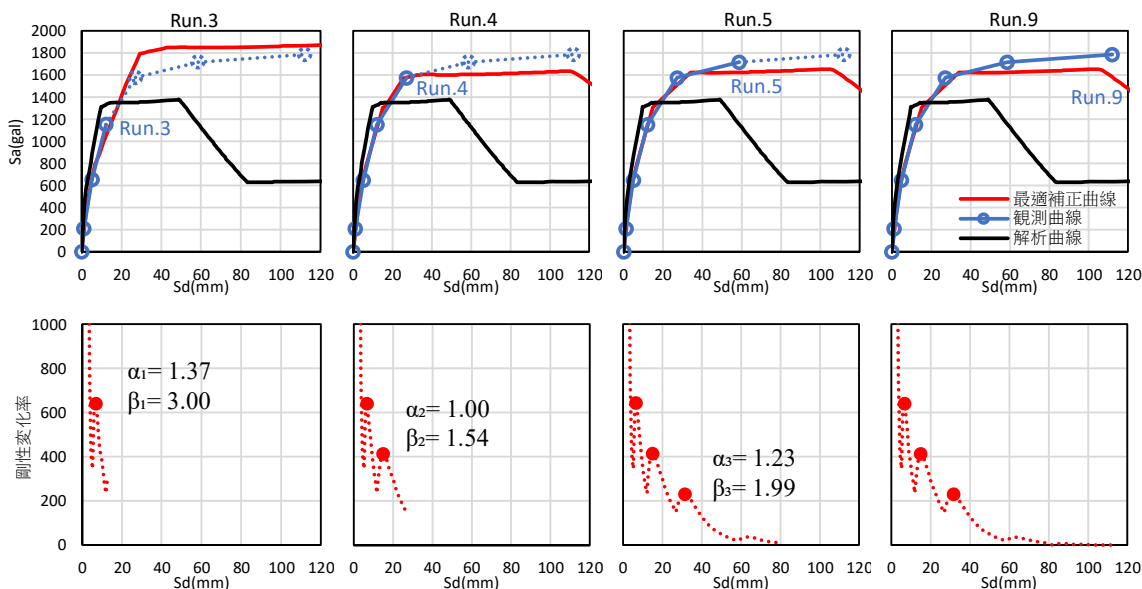


図 3.1.2-13 特性点フィッティング法による補正曲線

(4) 将来の地震動による応答の推定

補正した性能曲線を用いて、応答スペクトル法により将来起こり得る未経験領域の応答推定を行い、実験結果との比較を行うことでその精度を検討する。ただし、等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  については、建築基準法告示（限界耐力計算法）の評価式(3.1.2-2)に設計上の余裕度が含まれるため、観測記録に基づき、式(3.1.2-3)における弾性時減衰  $h_e$  と第 2 項の係数  $\gamma$  を補正した上で応答を推定することとする。

$$h_{eq} = 0.05 + 0.25 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \tag{式(3.1.2-2)}$$

$$h_{eq} = h_e + \gamma \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \tag{式(3.1.2-3)}$$

$\mu$  : 塑性率

等価粘性減衰定数の補正については、性能曲線の補正法 a) 係数倍法、b) 特性点フィッティング法との平仄を合わせるため、それぞれ異なる方法を適用して検討を行うこととした。それぞれの補正を用いて応答スペクトル法により求める将来の地震動による応答推定結果を以下に示す。

① 係数倍法 - 最小 2 乗法

性能曲線の補正における係数倍法と同様の考え方で、等価粘性減衰定数の告示式を観測記録に基づき補正した。補正式は、建築基準法告示の式(3.1.2-3)における第 2 項の係数  $\gamma$  (0.25) を縦軸方向の平均誤差  $\Delta$  が最小となるように決定するとともに、弾性時減衰  $h_e$  については一定と考える場合（補正方法 A）と、線形近似と考える場合（補正方法 B）の 2 種類を検討する。

補正に使用する観測記録の範囲を弾性範囲から非弾性範囲まで変化させ、応答推定を行った結果を図 3. 1. 2-14～図 3. 1. 2-19 に示す。応答推定において使用する性能曲線は、Run. 1～Run. 3 については平均補正曲線、Run. 4～Run. 5 については最適補正曲線とした。

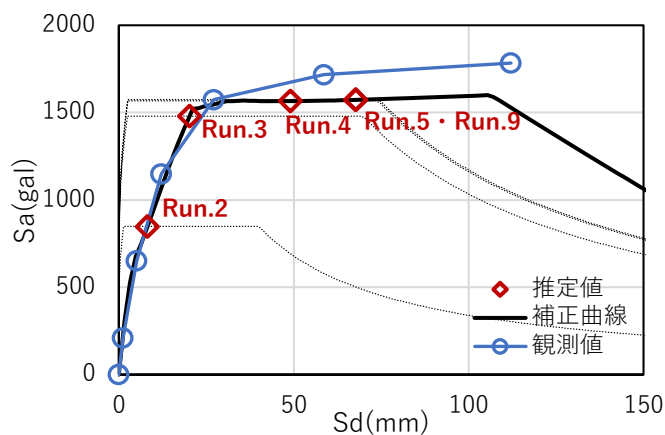
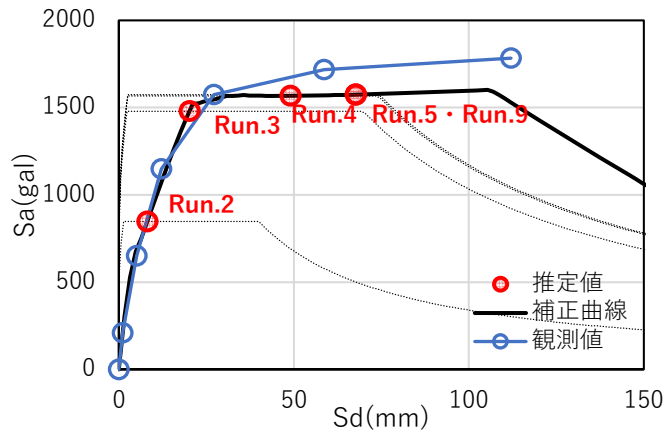


図 3. 1. 2-14 Run. 1 平均補正曲線による未経験領域の応答推定

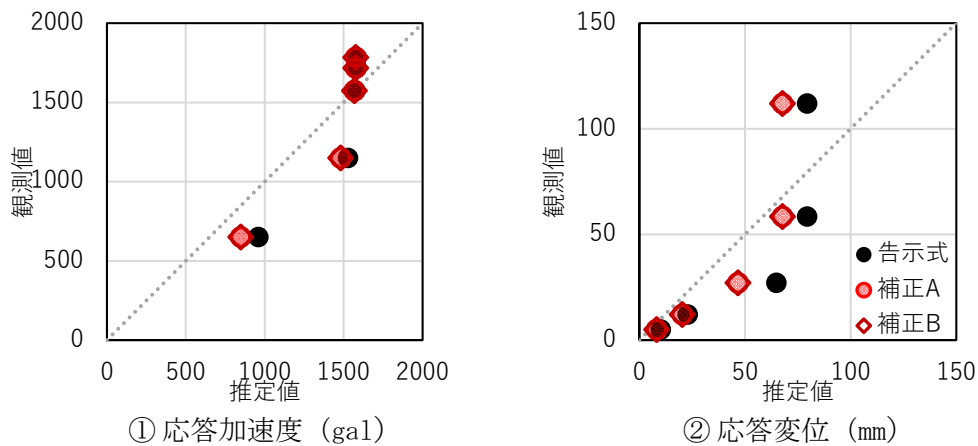


図 3. 1. 2-15 Run. 1 平均補正曲線による未経験領域の応答推定結果

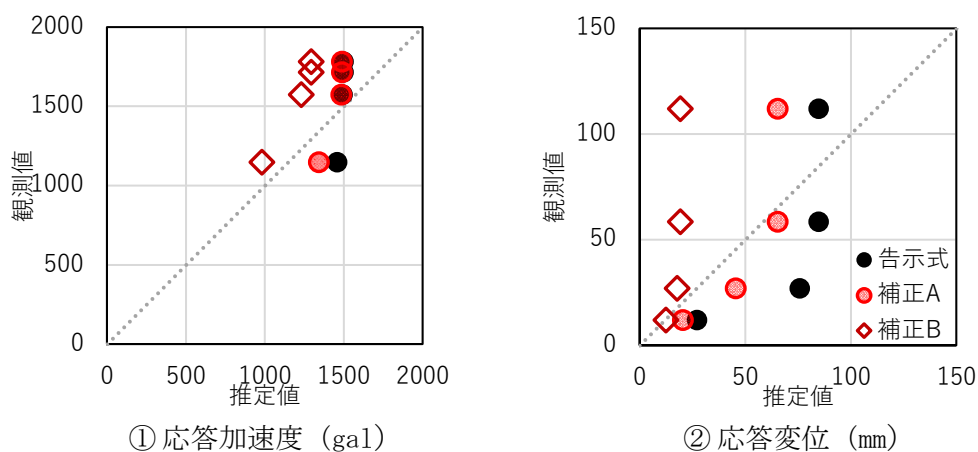


図 3. 1. 2-16 Run. 2 平均補正曲線による未経験領域の応答推定結果

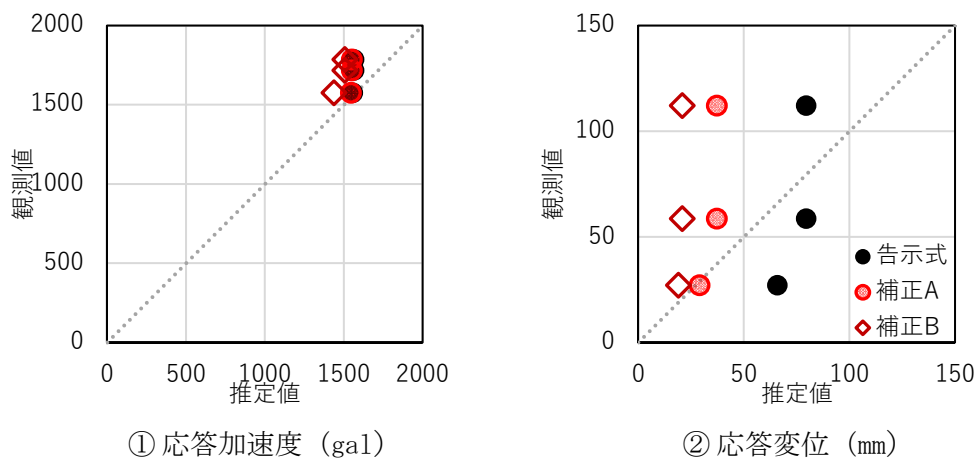


図 3. 1. 2-17 Run. 3 平均補正曲線による未経験領域の応答推定結果

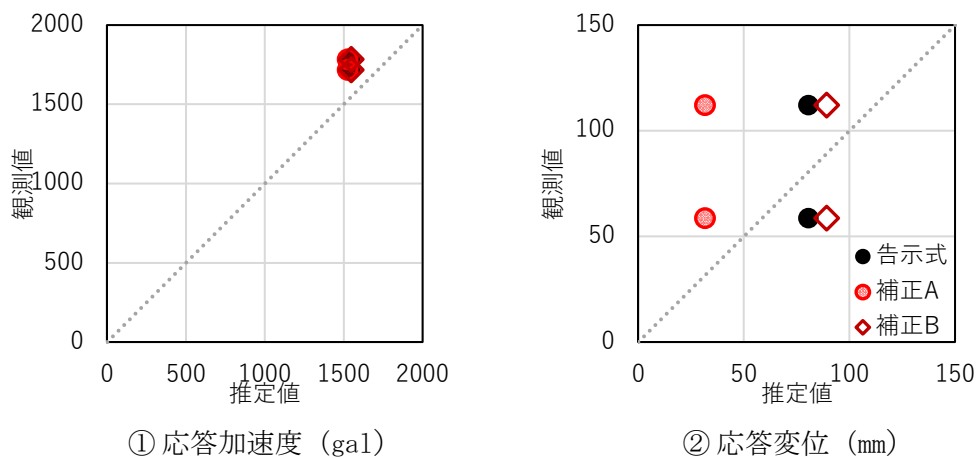


図 3. 1. 2-18 Run. 4 最適補正曲線による未経験領域の応答推定結果

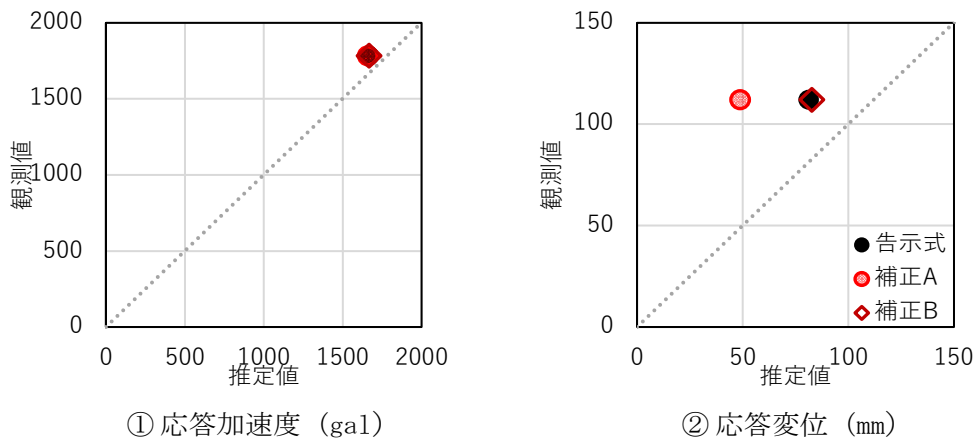


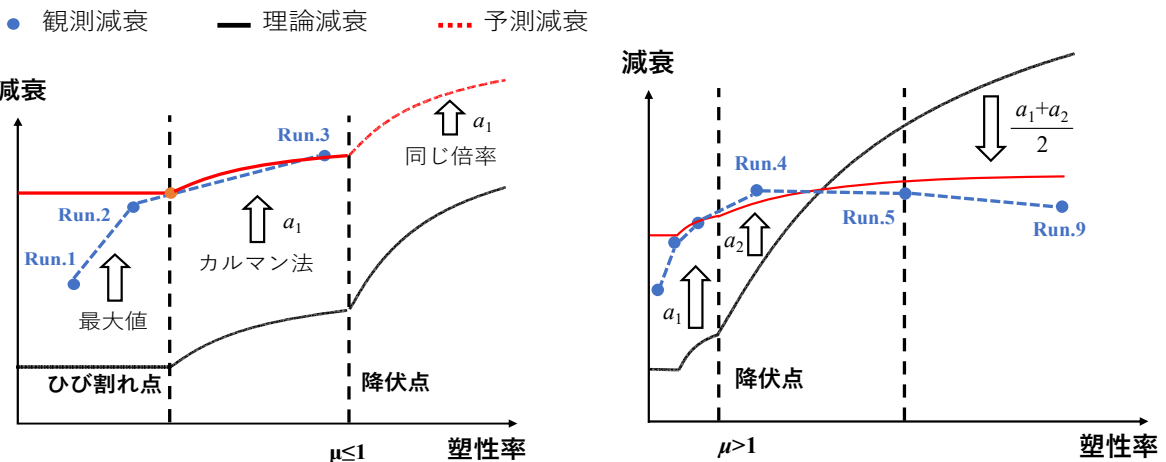
図 3. 1. 2-19 Run. 5 最適補正曲線による未経験領域の応答推定結果

② 特性点フィッティング法 - カルマン法

武田モデル<sup>[3. 1. 2-9], [3. 1. 2-10], [3. 1. 2-11]</sup>による等価粘性減衰定数の理論式の補正を行う。補正方法の概念を図 3. 1. 2-20 に示す。

- 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更新することで減衰の予測を行う。
- 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 $\mu$ 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更新する。

以上より、補正に使用する観測記録の範囲を弾性範囲から非弾性範囲まで変化させ、応答推定を行った結果を図 3. 1. 2-21～図 3. 1. 2-23 に示す。



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. 2-20 等価粘性減衰定数の補正方法



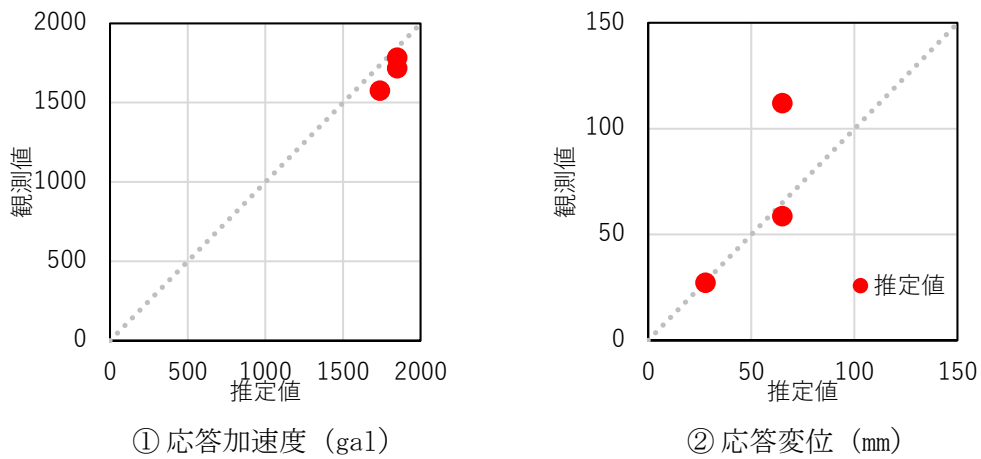


図 3. 1. 2-21 Run. 3 補正曲線による未経験領域の応答推定結果

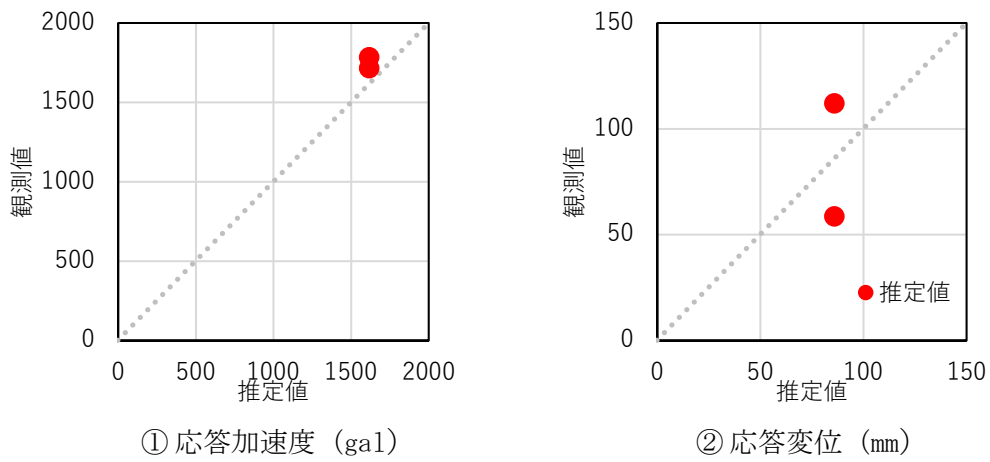


図 3. 1. 2-22 Run. 4 補正曲線による未経験領域の応答推定結果

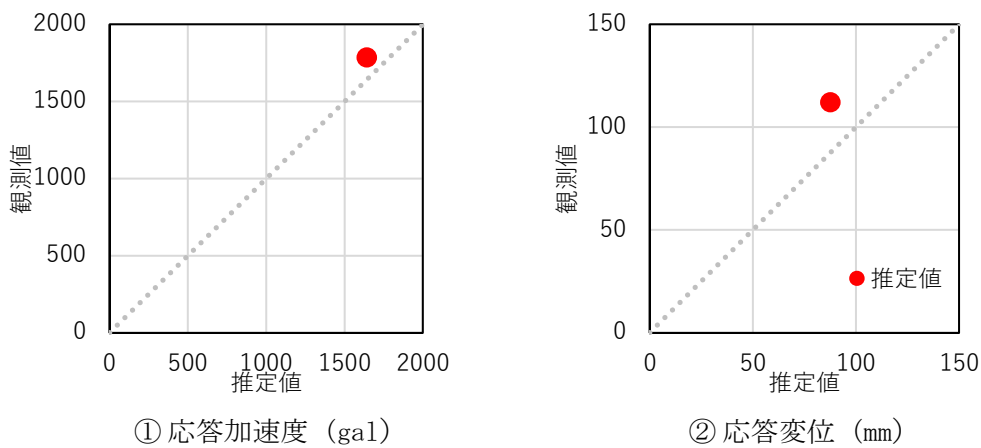


図 3. 1. 2-23 Run. 5 補正曲線による未経験領域の応答推定結果

(4)①、(4)②のどちらにおいても、補正した等価粘性減衰定数の評価式を使用することで、予測の精度を向上させることができた。①においては、特に観測記録を使用

した次の加振 Run の応答について、精度良く予測を行うことができた。またその際、弾性範囲の観測記録のみを使用する場合には補正方法 A、塑性範囲の観測記録も使用する場合には補正方法 B を用いると、より良い結果となる傾向が見られた。②においては、観測記録を使用した次の加振 Run の応答予測に加え、その後の Run の予測についても概ね精度良く行うことができた。しかし、どちらの方法においても塑性範囲の応答推定については、推定誤差がやや大きい傾向があるため、引き続きの検討課題とする。

(5) 応答に基づく被災度レベルの推定

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 3.1.2-12②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。被災度区分に使用するための特性点は瞬間剛性の変化率の極値上位 5 つを選ぶこととした (図 3.1.2-24)。

① 係数倍法

以上より、使用する観測記録の範囲を変化させ、被災度予測を行った結果を表 3.1.2-2 に示す。ただし、予測に使用する性能曲線は、弾性範囲 (Run. 1~Run. 9) では平均補正曲線、塑性範囲 (Run. 4~Run. 9) では最適補正曲線とした。

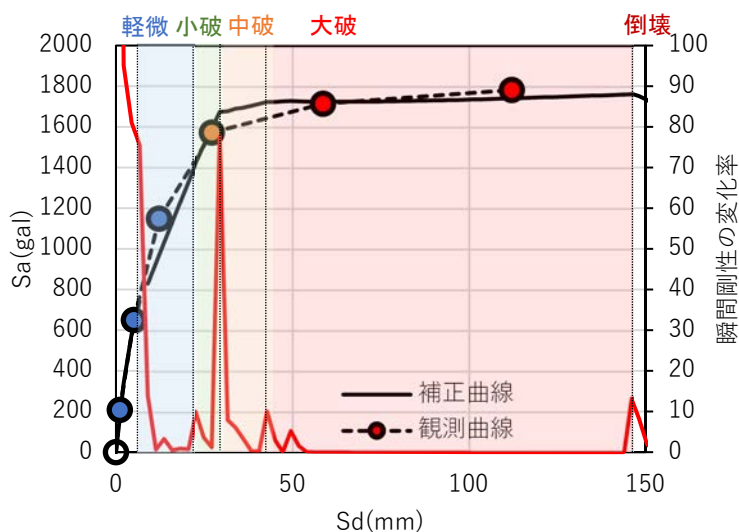


図 3.1.2-24 特性点に基づく被災度区分の例

表 3.1.2-2 係数倍法による被災度予測結果

	実験結果	判定結果（使用する観測記録を変化させた）				
		Run.1	Run.2	Run.3	Run.4	Run.5
Run.1	軽微	—	—	—	—	—
Run.2	軽微	軽微	—	—	—	—
Run.3	軽微	小破	小破	—	—	—
Run.4	中破	大破	大破	中破	—	—
Run.5	大破	大破	大破	大破	大破	—
Run.9	大破	大破	大破	大破	大破	大破

Run. 1、Run. 2 終了時点での観測記録のみを用いて将来の被災度予測を行うと、やや安全側での予測となった。一方 Run. 3 以降の観測記録を用いると、被災度の予測は実験と一致する結果となった。応答推定には誤差があるものの、被災度については観測記録の範囲によらず概ね正しく評価できる結果となり、検討対象の実験においては、提案手法により将来の地震動に対するおおよその被災度予測を行うことができた。

② 特性点フィッティング法

使用する観測記録の範囲を変化させ、被災度予測を行った結果を表 3.1.2-3 に示す。

表 3.1.2-3 特性点フィッティング法による被災度予測結果

	実験結果	判定結果（使用する観測記録を変化させた）				
		Run.1	Run.2	Run.3	Run.4	Run.5
Run.1	軽微	—	—	—	—	—
Run.2	軽微	—	—	—	—	—
Run.3	軽微	—	—	—	—	—
Run.4	中破	—	—	小破	—	—
Run.5	大破	—	—	中破	大破	—
Run.9	大破	—	—	中破	大破	大破

予測の結果、弾性範囲（Run. 3）の観測記録のみの場合には損傷レベルが過小評価される傾向があった。しかし、塑性範囲の観測記録も使用する場合には、予測と観測の損傷レベルは同じであった。

(6) まとめ・結論

- ① 平均補正法と特性点フィッティング法を使用することで、観測記録が弾性範囲のみの場合から性能曲線の補正を比較的精度良く補正を行うことができた。
- ② 観測記録を用いて減衰を補正することで応答推定の精度を向上させることができ、特に観測記録を使用した次の加振 Run の応答については精度良く予測することができた。

③ 特性点により性能曲線を区分することで被災度の予測を概ね正しくできることが確認できた。

一連の方法は 1 つの実験のみの検討しか行っていないため、今後小型振動台実験を用いた検討を行うとともに、原子炉建屋への適用性の確認を行っていきたい。

### 3.1.3 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4年度）

#### 【令和3年度までの実施内容及び成果（概要）】

- (1) 建屋の弾性時の固有周期は0.15～0.20 s程度であることを確認した。建屋の損傷と劣化の進行により、これよりも固有周期は長くなる。RC部材では、ひび割れを生じると剛性が半分低下することが知られている。これらを考慮し、振動装置は、鋼製梁が0.2～0.4 sの固有周期で振動するようにばねとおもりで調整した。静止時の測定では、ばねをねじ棒に変えることで鋼製梁の傾斜を固定する方法を採用した。
- (2) 静止時の回転角は、0.001 radから0.03 radの範囲で正負交番漸増の振幅で鋼製梁を静止させ、加速度センサで測定した。振動時の回転角は、固有周期0.2 s、0.3 s、0.4 sのセットアップで鋼製梁を振動させ、ジャイロセンサで測定した。鋼製梁の回転角は変位計でも測定し、その結果と比較することで測定精度を検証した。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。
- (3) 測定結果の誤差率を算出して定量的な検証を行った。その結果、静止時の回転角測定については、サンプリング周波数125 Hz、レンジ2 Gの加速度センサを用いて、静止状態で30 s間の測定値の平均を用いることで、建物の変形を測定するのに十分な精度を有することが確認できた。振動時の回転角測定については、サンプリング周波数200 Hzのジャイロセンサを用いて角速度を測定し、角速度の全データの平均値を控除する方法で基線補正を行い、サンプリング周期を乗じて積分することで、建物の変形を測定するのに十分な精度を有することが確認できた。ただし、低振動数での誤差は大きく、基線補正や積分方法を改良する余地はある。静止時の部材変形の測定については、RC梁の4点曲げ試験の結果より、加速度センサで多点測定を行い、たわみ曲線と同定することで、十分な精度で変形測定が可能であることが確認された。

#### 【令和4年度実施内容及び成果】

##### (1) RC壁試験体を用いた振動実験

###### ① 目的

令和3年度に行ったRC梁の4点曲げ実験結果より、静止時の部材変形は、加速度センサで多点測定を行い、たわみ曲線と同定することで十分な精度で測定可能であることが確認された。これを振動時の変形測定に応用するために、RC壁試験体を用いた振動実験を行った。

###### ② 実験計画

図3.1.3-1に試験体図、図3.1.3-2に試験装置に取り付けた写真、図3.1.3-3に振動実験装置図を示す。試験体はRC造、幅広の片持ち部材で壁型の配筋とした。スライドレールに載っているアクチュエータ治具に試験体スタブを固定し、壁頂部におもりを取り付けて振動させる加振方法とした。試験体はスタブ底面をピンローラーで支持されている。アクチュエータの容量は、最大試験力2000 kN、最大速度50 cm/s、最大振動数3 Hzである。

試験体寸法は、D6異形鉄筋を複配筋できるように壁厚を80 mmとし、おもり560 kgを試験体に取り付けて500 galの入力加速度で曲げ降伏するように、D6の軸方向引張鉄

筋（主筋）を7本ずつ、壁高さを1600 mmとした。壁の左右は柱型の配筋、すなわちD6の帯筋を100 mm間隔で配置し、壁の横筋はD6異形鉄筋を200 mm間隔で配置した。D6異形鉄筋の降伏強度は421 N/mm<sup>2</sup>、コンクリートのシリンダー圧縮強度は34.5 N/mm<sup>2</sup>である。

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。壁頭の変位測定値は、壁試験体をおもりと壁体の2質点系と仮定した時の1次振動モードの等価高さで、壁脚の危険断面から1435 mmとした。主筋には壁脚の危険断面位置にひずみゲージを貼付し、主筋の軸方向ひずみを測定した。試験体には、図3.1.3-4(a)に示す位置に10個のジャイロセンサを設置した。ジャイロセンサは壁の左右に2個1組、高さ方向はスタブ部分の1箇所と壁部分の4箇所に取り付けた。図3.1.3-4(b)は同定するたわみ曲線の例を示している。壁脚の危険断面で原点を通るものと仮定し、たわみ曲線は、4箇所のセンサ回転角を用いる場合は4次関数、3箇所のセンサ回転角を用いる場合は3次関数として同定する。ジャイロセンサの角速度から回転角を算出する方法は後述する。

使用したセンサは、微小電気機械システム（Micro Electro Mechanical Systems：以下、「MEMS」という。）による慣性計測装置（Inertial Measurement Unit：以下、「IMU」という。）センサで、3軸ジャイロセンサと3軸加速度センサが内蔵されている。仕様は、寸法36×31×11 mm、重さ11 g、角速度レンジ±2000 dps、加速度レンジ±16 G、内部サンプリング数800 Hz、出力サンプリング数120 Hzである。

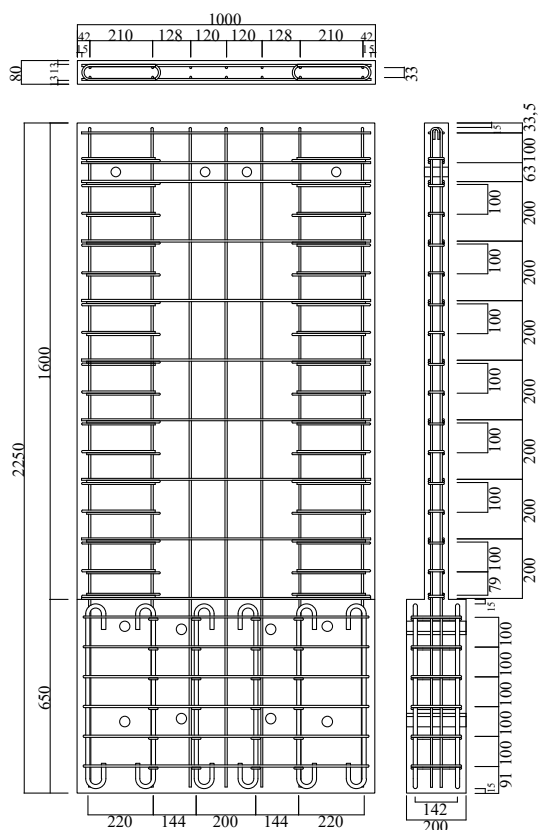


図 3.1.3-1 試験体図

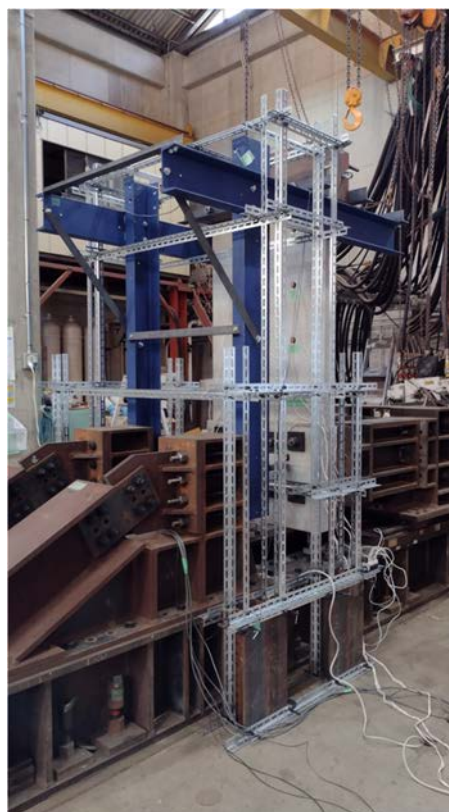


図 3.1.3-2 振動実験セットアップ

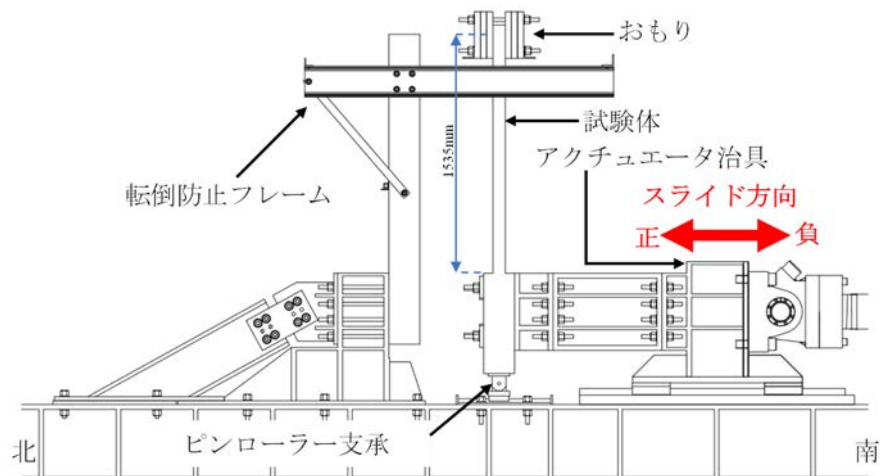
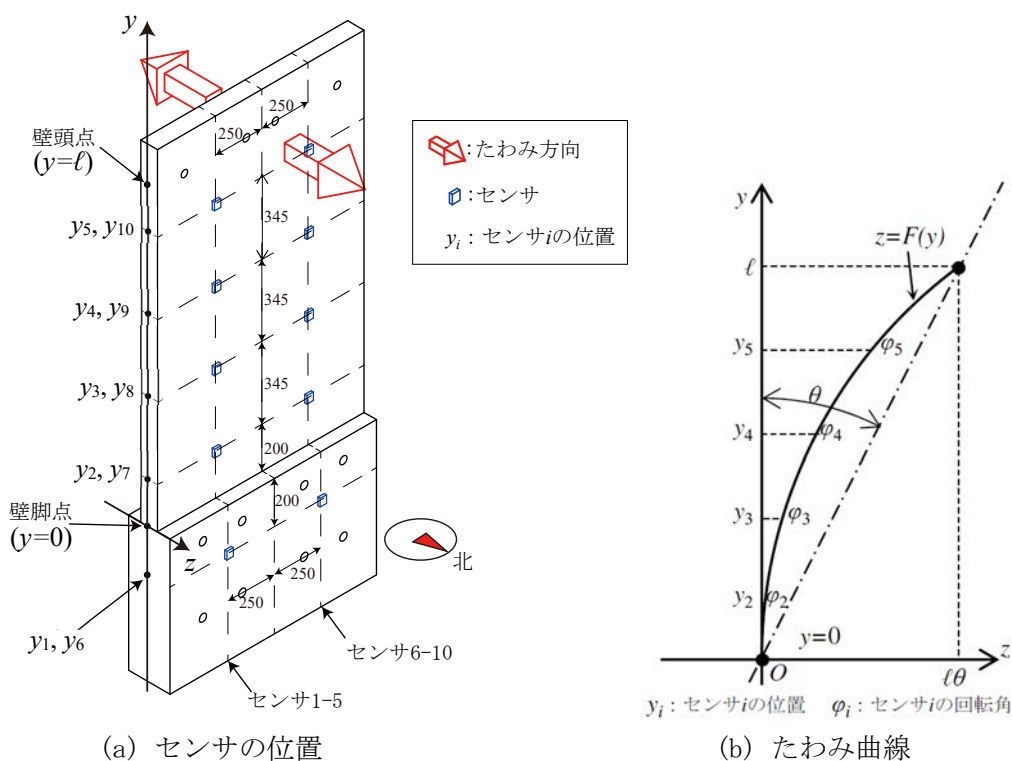


図 3. 1. 3-3 振動実験装置図



(a) センサの位置

(b) たわみ曲線

図 3. 1. 3-4 センサの取り付け位置とたわみ曲線の関係

### ③ 実験結果

加振は、アクチュエータで正弦波を入力した。表 3. 1. 3-1 に加振と加振後の固有周期の変化を示す。固有周期は、表 3. 1. 3-1 の加振後に最大加速度 30 gal のスイープ波（振動数を 0.3 Hz から 3 Hz まで徐々に変化させる正弦波）を入力し、スタブと壁頭に取り付けた加速度センサの測定値を用いた伝達関数より算出した。表 3. 1. 3-1 より、ひび割れが観測された加振 No. 2、主筋が降伏した加振 No. 3、大きく変位させた加振 No. 8 で固有周期が長くなっており、損傷状態と固有周期の変化の対応が見られた。

主筋が降伏した加振 No. 3 におけるジャイロセンサの角速度と時間の関係（代表としてセンサ 2 とセンサ 5）を図 3. 1. 3-5 に示す。壁脚に近いセンサ 2 は、壁頭に近いセンサ 5 に比べて角速度が小さいことが分かる。図 3. 1. 3-6 に高さ方向の角速度分布を示す。

角速度は各高さのセンサ 2 個ずつを平均したもので、壁頭に最も近いセンサ 5 とセンサ 10 の平均値の大きさが最大となった時の角速度分布である。図 3.1.3-6 より、主筋が降伏する前の加振 No. 1.1 と加振 No. 2 では高次モードの影響が見られるが、主筋が降伏した後は、1 次振動モードが卓越していることが分かる。また、スタブ部分の角速度は他の位置に比べて十分に小さいことが分かる。

表 3.1.3-1 正弦波の加振と固有周期の変化

加振 No.	損傷状態	振幅	振動数	正弦波数	固有周期*
1.1	弾性状態 1	5 mm	2 Hz	3 波	0.18 sec
1.2	弾性状態 2	5 mm	2 Hz	6 波	0.19 sec
2	ひび割れ視認	10 mm	2 Hz	6 波	0.23 sec
3	主筋降伏	15 mm	2 Hz	6 波	0.98 sec
4	弾塑性状態 1	15 mm	2 Hz	3 波	0.92 sec
5	弾塑性状態 2	7 mm	3 Hz	3 波	0.98 sec
6	弾塑性状態 3	15 mm	1.5 Hz	3 波	0.93 sec
7	終局状態 1	20 mm	2 Hz	6 波	0.99 sec
8	終局状態 2	30 mm	2 Hz	3 波	1.10 sec

\* 加振後のスイープ波入力で得られた固有周期

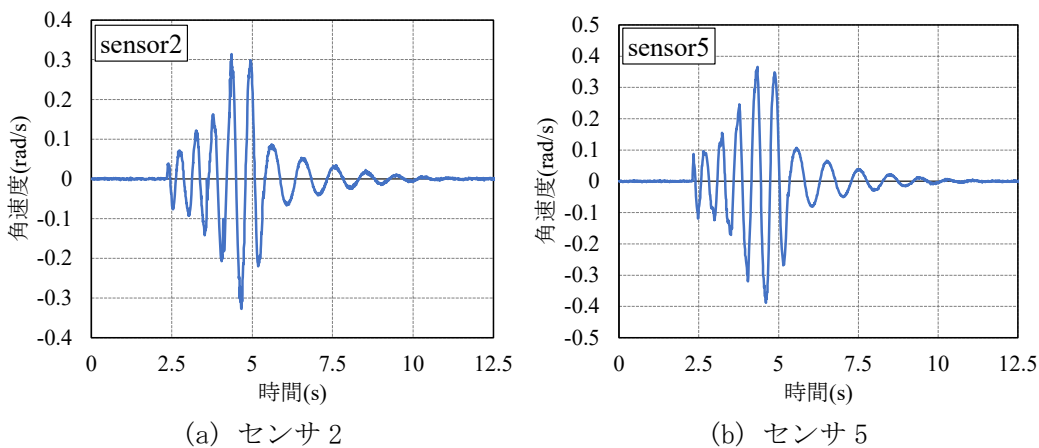


図 3.1.3-5 加振 No. 3 (主筋降伏) での角速度と時間の関係

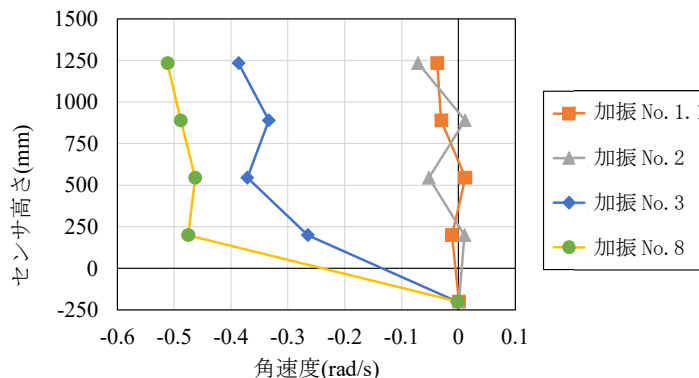


図 3.1.3-6 角速度の高さ方向の分布



## (2) 振動実験結果と静的加力実験結果の比較

### ① 目的

動的な変形性状測定の基本技術として、ジャイロセンサから得られた角速度を積分してセンサ位置での回転角を算出し、たわみ曲線と同定することで振動時の変形を測定する方法を検証する。静的加力実験結果と比較するため、振動実験で用いた試験体と同一設計の RC 壁試験体を準備し、静的加力実験で令和 3 年度と同様に加速度センサの多点測定を行い、たわみ曲線と同定して静止時の変形を測定する。加速度センサによる静止時の変形測定結果と、ジャイロセンサによる振動時の変形測定結果を比較する。

### ② 実験計画及び結果

静的加力実験に用いた試験体 No. 1 は、図 3.1.3-1 に示した振動実験の試験体 No. 2 と同一設計で、同一材料を用い、鉄筋には同一位置にひずみゲージを貼付した。図 3.1.3-7 に静的加力実験装置図を示す。スライドレールに載っているアクチュエータ治具に試験体スタブを固定し、壁頭をピン支持して加力する方法とした。壁頭のピン支持点にロードセルを設置して荷重を測定した。試験体はスタブ底面をピンローラーで支持されている。試験体の危険断面から壁頭のピン支持までの高さは、振動実験での 1 次振動モードの等価高さと同じ 1435 mm とした。試験体の変位は、壁頭のピン支持位置とスタブで変位計を用いて測定した。表 3.1.3-2 に加力計画を示す。壁頭ピン支持位置とスタブの相対変位を高さ 1435 mm で除した値を部材角とし、正負交番繰り返し漸増変位で、加力 No. 1 から No. 10 まで同一変位幅を 2 回ずつ加力した。静的加力実験での加速度センサは、振動実験と同じ位置（図 3.1.3-4(a)）に設置した。使用したセンサは振動実験と同じ MEMS による IMU センサである。

静的加力実験の結果を図 3.1.3-8 に示す。加力 No. 3 で壁脚に曲げひび割れが発生し、剛性低下が見られた。加力 No. 6 で主筋が降伏しており、図 3.1.3-8 では丸印で示している。せん断スパン比が大きいため大変形でも最大耐力に到達せず、試験装置の容量と安全を考慮して、加力 No. 10 で実験を終了させた。

### ③ 振動実験結果と静的加力実験の比較

2 体の試験体のひび割れ図を図 3.1.3-9 に示す。いずれも壁脚にひび割れを生じており、振動実験の方がひび割れ数が少なく、集中していることが分かる。壁脚から 200 mm 程度の高さのひび割れはセンサを横切っており、ここは壁の横筋の位置で鉄筋の影響を受けている。振動実験と静的加力実験の荷重-変形関係の比較を図 3.1.3-10 に示す。振動実験は主筋が降伏した加振 No. 3 の結果で、その変位に対応する静的加力実験結果として加力 No. 1 から No. 8 までの結果を重ねている。振動実験結果の荷重は、等価高さ 1435 mm に設置した加速度センサの測定値に試験体の壁部分とおもりの質量の和を乗じたものである。図 3.1.3-10 より、荷重-変形関係は巨視的には一致していること、主筋降伏は振動実験の方がやや小さい変形で生じており、主筋降伏までの剛性は振動実験の方がやや高いこと、主筋降伏後の正側の荷重は両方で概ね一致していることが分かる。

センサの回転角をたわみ曲線と同定して壁頭変位を算出した結果と、変位計で壁頭変位を測定した結果を比較する。図 3.1.3-4(b) に示したように、たわみ曲線の傾きとセンサの回転角を同定することで壁頭の変位を算出する。なお、スタブに設置したセンサ 1 とセンサ 6 の回転角は他に比べて十分に小さかったため算定から除外した。静的加力実験では加速度センサの回転角とたわみ曲線を同定したもので、振動実験ではジャ

イロセンサの回転角とたわみ曲線を同定したものである。ジャイロセンサの回転角は、0.2 Hz 以下の測定値をカットした角速度を台形公式で積分して算定した。

図 3.1.3-11 に、静的加力実験における加力 No. 5～No. 10 の結果を、図 3.1.3-12 に、振動実験における加振 No. 3 と No. 8 の結果を示す。いずれの図でも、変位計による結果に対する差を、センサによる測定の誤差と考える。静的加力実験結果は、ひび割れの影響を受けたセンサ 2 とセンサ 6 を除外し、3 箇所センサ回転角を用いて 3 次関数のたわみ曲線と同定した。振動実験でもセンサ 2 とセンサ 6 はひび割れの影響を受けたが、高次の振動モードが含まれているため、4 箇所センサ回転角を用いて 4 次関数のたわみ曲線と同定した。図 3.1.3-11 と図 3.1.3-12 の破線は鉄筋の初降伏を示しており、鉄筋降伏レベルの変形では、静的加力時の加速度センサと振動時のジャイロセンサの測定精度は、巨視的に同程度と言える。60mm を超えるような大変形では、最大変位は同程度の精度で測定できているが、ジャイロセンサでの結果は振動後の残留変位で誤差が大きくなっている。これらの結果より、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方法が有効であることが示された。

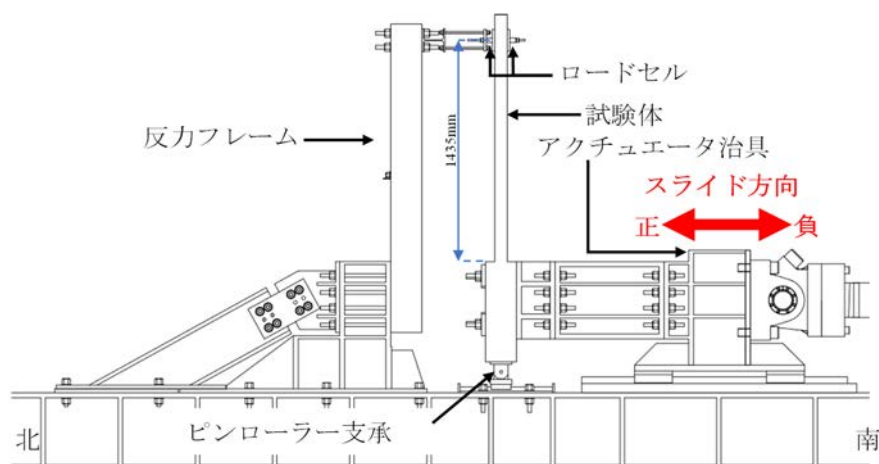


図 3.1.3-7 静的加力実験装置図

表 3.1.3-2 静的加力計画

加力 No.	損傷状態	部材角の変動幅 ( $\times 10^{-2}$ rad)	繰り返し数
1	弾性状態 1	$\pm 0.067$	2 回
2	弾性状態 2	$\pm 0.125$	2 回
3	ひび割れ視認	$\pm 0.250$	2 回
4	ひび割れ状態 1	$\pm 0.500$	2 回
5	ひび割れ状態 2	$\pm 1.000$	2 回
6	主筋降伏	$\pm 1.500$	2 回
7	弾塑性状態 1	$\pm 2.000$	2 回
8	弾塑性状態 2	$\pm 3.333$	2 回
9	弾塑性状態 3	$\pm 5.000$	2 回
10	弾塑性状態 4	$\pm 8.333$	2 回

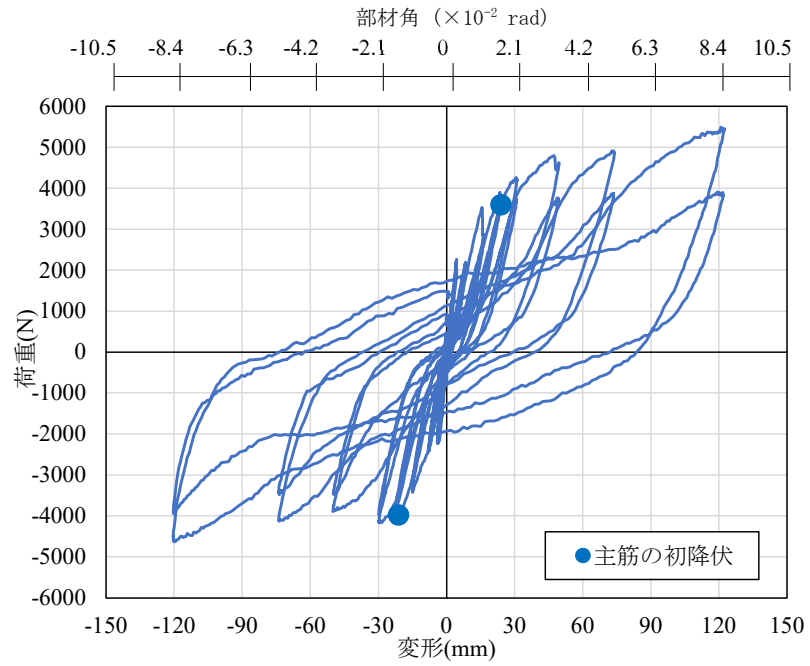
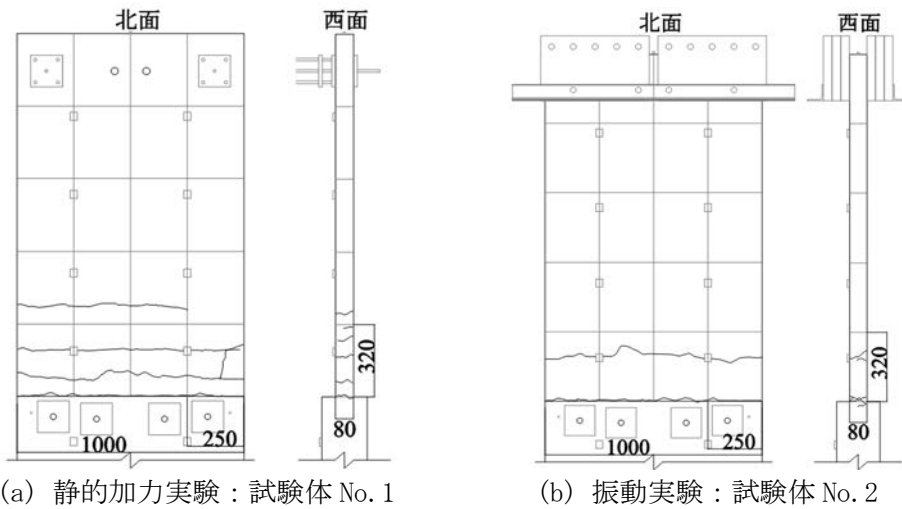


図 3.1.3-8 静的加力実験における荷重－変形関係（部材角：表 3.1.3-2 参照）



(a) 静的加力実験：試験体 No. 1

(b) 振動実験：試験体 No. 2

図 3.1.3-9 試験体 No. 1 と No. 2 のひび割れ図

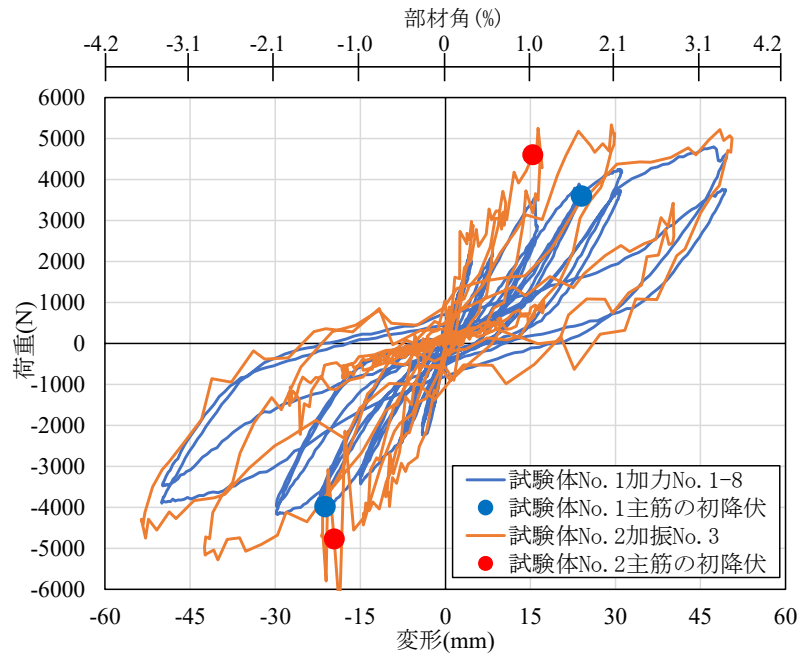


図 3.1.3-10 振動実験と静的加力実験の荷重-変形関係の比較

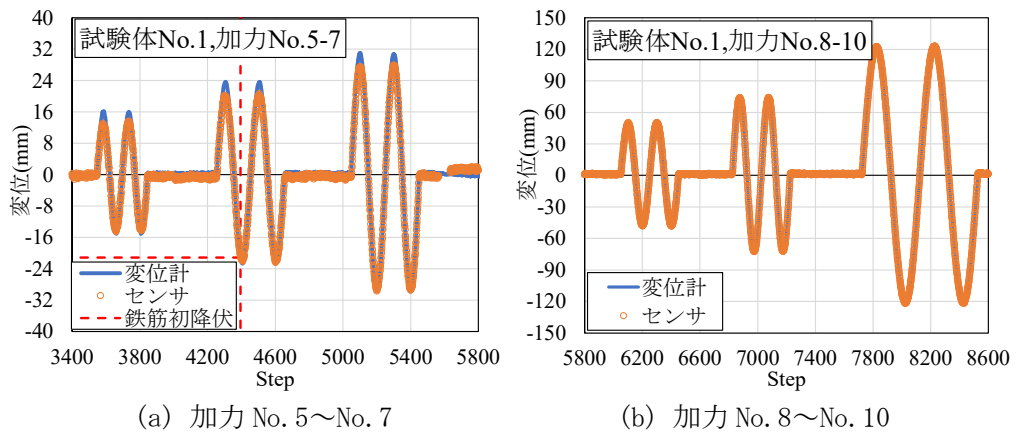


図 3.1.3-11 変位計とセンサによる壁頭変位の比較 (静的加力実験)

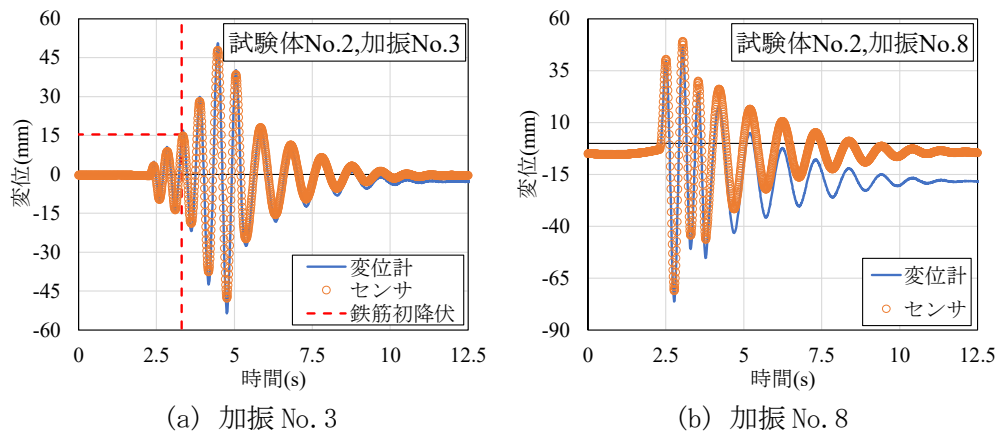


図 3.1.3-12 変位計とセンサによる壁頭変位の比較 (振動実験)

## (3) 原子炉建屋を模した FEM モデルによる解析

## ① 目的

劣化が進行する原子炉建屋において、センサは壁などの鉛直部材に設置し、傾斜角を測定することで建物の変形をモニタリングすることを想定している。設置する位置の選定方法は、通常時の解析に用いる FEM モデル（以下、「詳細モデル」という。）と、地震時の挙動を解析する FEM モデル（以下、「簡易モデル」という。）の 2 つを組み合わせる計画である。時刻歴応答解析に通常用いられる多質点系モデルでは、各層の水平変位は 1 つずつだが、劣化の進行する建屋では同一階で異なる挙動を生じると考えられるため、立体モデルが必要となる。詳細モデルを用いた時刻歴応答解析によって解を得ることは困難なため、解析可能なサイズを検討し、簡易モデルを構築する。令和 4 年度は、センサを取り付ける位置を選定するための基礎的な手法として、時刻歴応答解析が可能で詳細モデルと等価なモデル化手法を考案する。

## ② 解析計画

詳細モデルは、令和 3 年度に作成した弾性体の建屋モデルを踏襲し、壁や床などの部材がモデル化されている。固有値解析、重力を作用させる解析、静的な強制変位を与える解析に用いる。図 3.1.3-13 に詳細モデルを示す。参考とした建物は 1F 第 3 号機の原子炉建屋である。令和 3 年度の FEM モデルと同様に、損傷・撤去された屋根部分はなく 5 階床までのモデルだが、より実状に合うように断面寸法を修正した。令和 3 年度の検討結果より、原子炉格納容器と原子炉圧力容器は建物の振動には影響を与えないためモデル化していない。詳細モデルは、基礎マットスラブをソリッド要素、耐震壁と遮蔽壁と地上階の床はシェル要素、柱と梁はビーム要素とした。基礎マットスラブの底面を固定とし、地下での地盤の側圧は含めていない。劣化の程度は、「正常」、「損傷」、「崩落」の 3 段階を想定し、例えば 5 階床の北半分を「崩壊」のグループにするなど、シナリオによってグループ分けできるような枠組みを作成した。

簡易モデルは、詳細モデルと同様に FEM モデルだが、時刻歴応答解析が可能となるように節点数と要素数が十分に少ないものとした。詳細モデルでは要素数合計が 10103 要素（地下 1 階床を 28×23 分割、1 層を 4 分割、遮蔽壁断面を三十二角形）に対し、簡易モデルでは 446 要素（地下 1 階床を 6×5 分割、1 層を 2 分割、遮蔽壁断面を八角形）と、1/20 以下の要素数とした。簡易モデルは、時刻歴応答解析に用いるための立体 FEM モデルである。簡易モデルを図 3.1.3-14 に示す。梁付き床部材と柱付き壁部材をシェル要素、基礎マットスラブはソリッド要素とした。梁と床の断面リストを表 3.1.3-3 に、柱と壁の断面リストを表 3.1.3-4 に示す。簡易モデルは、固有周期と固有モードが詳細モデルと同程度となるよう、次のようにモデル化した。

- ✓ 梁付き床部材は、弾性曲げ剛性が等価な板材に置換し、軸方向鉄筋量は変えずに、降伏曲げモーメントが等価となる軸方向鉄筋位置を定めた。
- ✓ 柱付き壁部材は、断面積が等価な板材に置換し、軸方向鉄筋量は変えずに、面外曲げに対して降伏曲げモーメントが等価となる軸方向鉄筋位置を定めた。
- ✓ シェル要素数の削減によって面内曲げ変形を過小評価するため、コンクリートのヤング率を 0.8 倍に低減した。

③ 解析結果

簡易モデルと詳細モデルの固有周期及び固有モードを比較する。図 3.1.3-15 に東西方向の固有振動モード、図 3.1.3-16 に南北方向の固有振動モード、図 3.1.3-17 にねじれの固有振動モードを示す。簡易モデルは、いずれの振動モードも詳細モデルと同程度の固有周期でモデル化されたことが確認できる。

次に、簡易モデルを用いた地震応答解析を行った。図 3.1.3-18 は入力地震波で、2011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である<sup>[3.1.3-1]</sup>。図 3.1.3-18 の地震波を簡易モデルの東西方向へ入力した。図 3.1.3-19 に地下階の層せん断力（ベースシア）ー建屋頂部水平変位の応答結果を示す。コンクリートのひび割れによる非線形性が若干生じた程度の応答であったが、実用上、地震動を入力した時刻歴応答解析が可能であることを確認した。

以上のように、原子炉建屋を模したFEMモデル（詳細モデル）を作成し、センサの取り付け位置を選定するための基礎的な手法として、時刻歴応答解析を行うための簡易なモデル化手法を開発した。

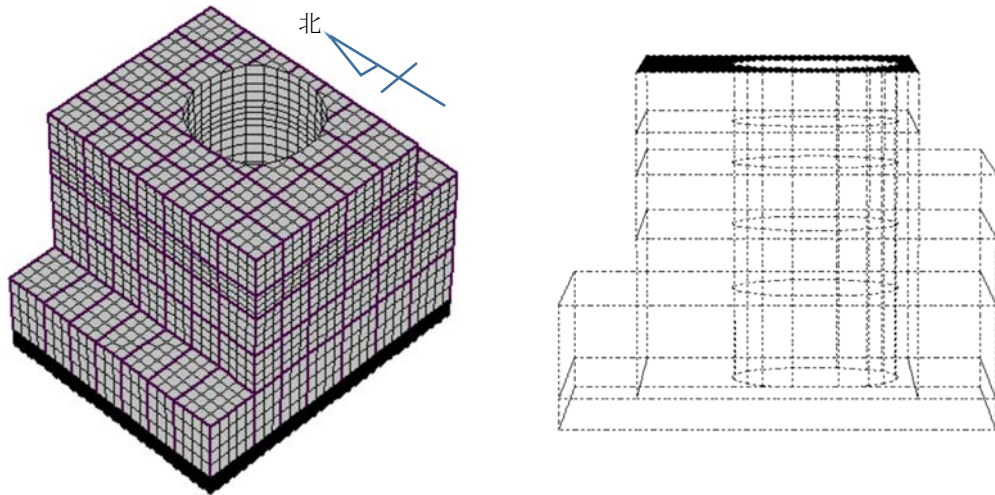


図 3.1.3-13 原子炉建屋を模した詳細モデル

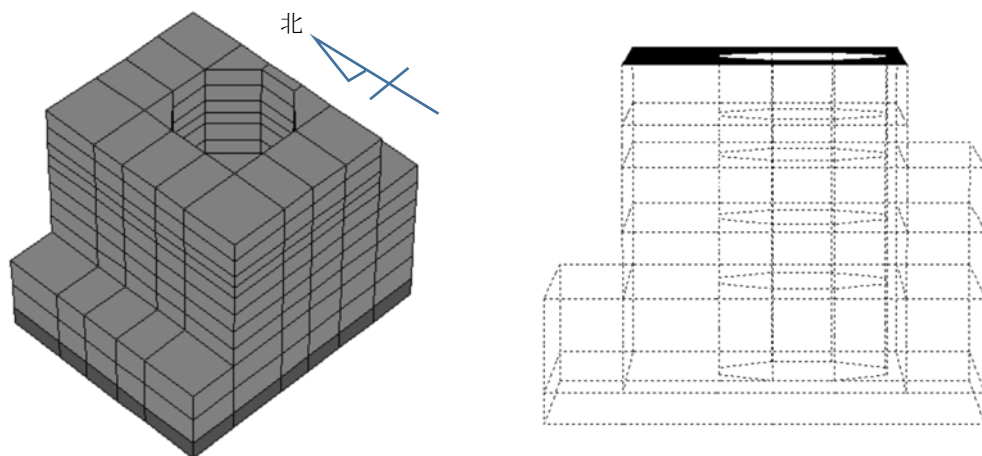


図 3.1.3-14 詳細モデルに類似した簡易モデル

表 3.1.3-3 梁及び床の断面リスト (単位 : mm)









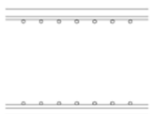


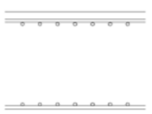


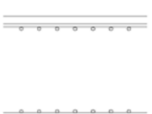
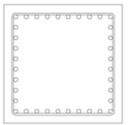




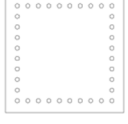






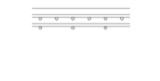

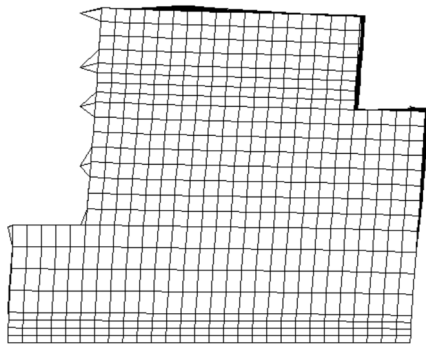
階	名称	梁 東西方向	梁 南北方向	名称	床
5	断面			断面	
	寸法	1100×2400	800×1300	厚さ	300
	主筋	20, 20-D38	16, 16-D32	長辺	2-D19@100
	補強筋	4-D16@100	4-D16@150	短辺	2-D19@100
4	断面			断面	
	寸法	950×2200	600×1200	厚さ	300
	主筋	14, 14-D38	5, 5-D32	長辺	2-D19@100
	補強筋	4-D16@300	2-D13@250	短辺	2-D19@100
3	断面			断面	
	寸法	950×2200	950×2200	厚さ	600
	主筋	14, 14-D38	9, 9-D38	長辺	2-D19@150
	補強筋	4-D16@150	4-D16@300	短辺	2-D19@150
2	断面			断面	
	寸法	1100×2200	950×2200	厚さ	600
	主筋	20, 20-D38	9, 9-D38	長辺	2-D19@100
	補強筋	4-D16@100	4-D16@300	短辺	2-D19@100
1	断面			断面	
	寸法	1100×2250	950×2250	厚さ	600
	主筋	20, 20-D38	9, 9-D38	長辺	2-D19@100
	補強筋	4-D16@100	4-D16@300	短辺	2-D19@100

表 3.1.3-4 柱及び壁の断面リスト (単位 : mm)

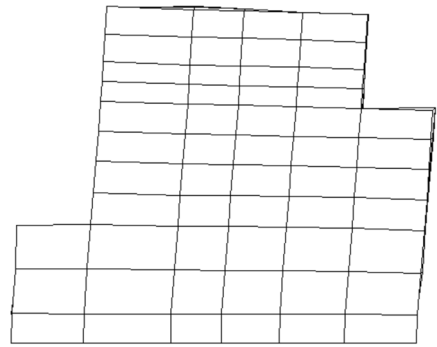
階	名称	柱	名称	外壁	
4	断面		断面		<p>遮蔽壁 B1~4F</p> 
	寸法	1100×1100	厚さ	500	
	主筋	36-D38	縦筋	2-D25@200	
	補強筋	2-D13@100	横筋	2-D25@200	
3	断面		断面		<p>厚さ : 2050 縦筋 : 2, 2-D38@100 横筋 : 2, 2-D38@100</p>
	寸法	1100×1100	厚さ	1100	
	主筋	36-D38	縦筋	2-D32@200	
	補強筋	2-D13@100	横筋	2-D32@200	
2	断面		断面		<p>内壁</p> 
	寸法	1100×1100	厚さ	1100	
	主筋	36-D38	縦筋	2-D32@200	
	補強筋	2-D13@100	横筋	2-D32@200	
1	断面		断面		
	寸法	1500×1500	厚さ	1500	
	主筋	52-D41	縦筋	2-D32@200+2-D32@400	
	補強筋	2-D16@100	横筋	2-D32@200+2-D32@400	
B1	断面		断面		
	寸法	1500×1500	厚さ	1500	
	主筋	52-D41	縦筋	2-D32@200+2-D32@400	
	補強筋	2-D16@100	横筋	2-D32@200+2-D32@400	





(1次モード、固有周期 0.19 s)

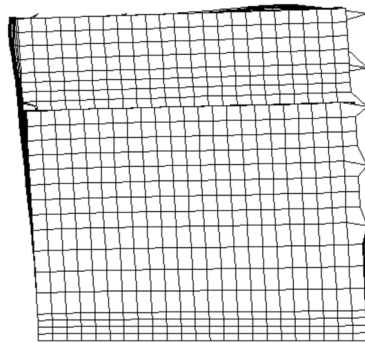
(a) 詳細モデル



(1次モード、固有周期 0.19 s)

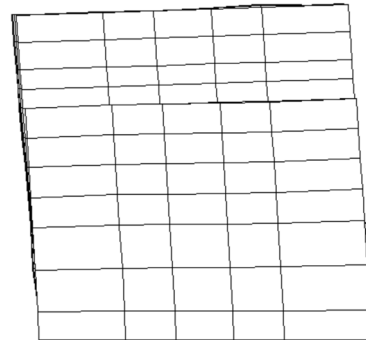
(b) 簡易モデル

図 3.1.3-15 東西方向の固有振動モード



(2次モード、固有周期 0.17 s)

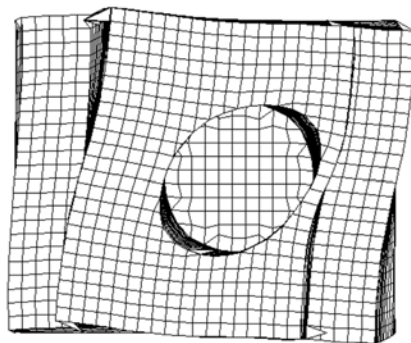
(a) 詳細モデル



(2次モード、固有周期 0.17 s)

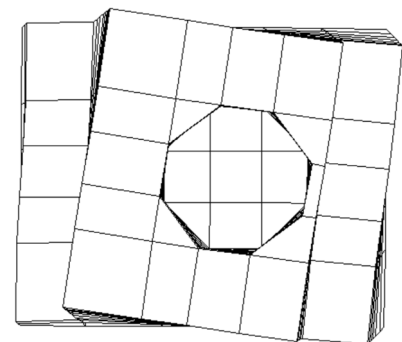
(b) 簡易モデル

図 3.1.3-16 南北方向の固有振動モード



(3次モード、固有周期 0.11 s)

(a) 詳細モデル



(4次モード、固有周期 0.12 s)

(b) 簡易モデル

図 3.1.3-17 ねじれの固有振動モード

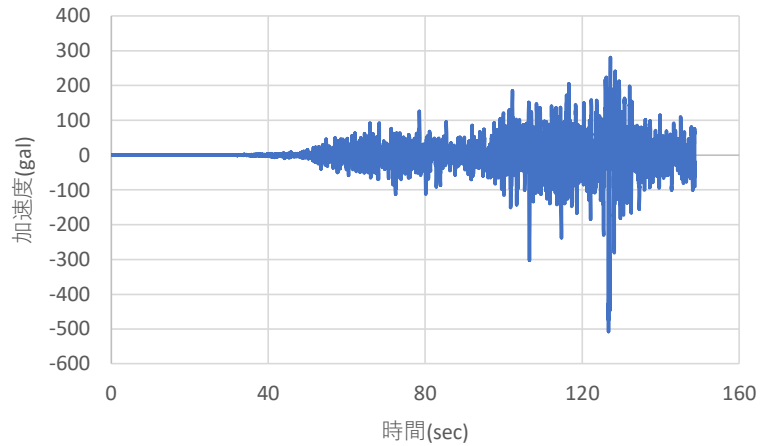


図 3.1.3-18 簡易モデルへの入力加速度（時間間隔 0.01 s）

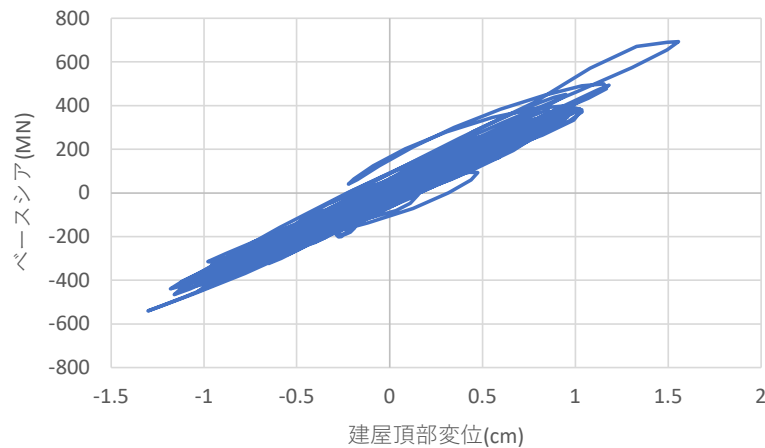


図 3.1.3-19 地下階の層せん断力（ベースシア）と建屋頂部の変位との関係

※ まとめ

(1) 動的応答・振動性状の観測

アルミニウム板を用いて、振動周期を変化させた 1 層架構試験体を製作した。試験体の振動実験を行い、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。

(2) 動的応答・振動性状の評価

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た。補正では、誤差を最小とする方法、カルマンフィルタを用いる方法などを開発し、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。

(3) 長期変形性状の観測及び評価

RC 壁試験体の振動実験を行い、壁の損傷に伴う固有周期の変化を壁試験体に設置した加速度センサで測定し、ジャイロセンサで振動時の角速度の高さ方向分布を測定した。

角速度を積分した傾斜角とたわみ曲線を同定することで振動時の壁の変形を算定し、同一設計の壁試験体の静的加力実験結果と比較し、振動時の変形測定が可能であることを確認した。原子力建屋を模した FEM モデルを作成し、そのモデルを時刻歴応答解析が可能なモデルに簡略化する方法を開発した。

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4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4年度）

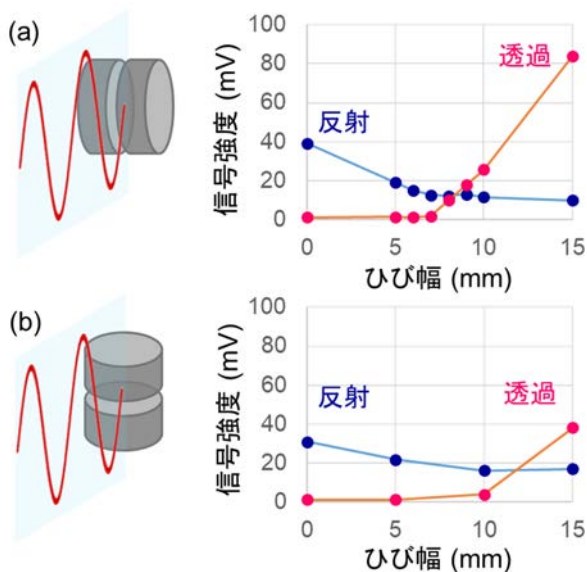
【令和3年度までの実施内容及び成果（概要）】

(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反応することが示唆された。



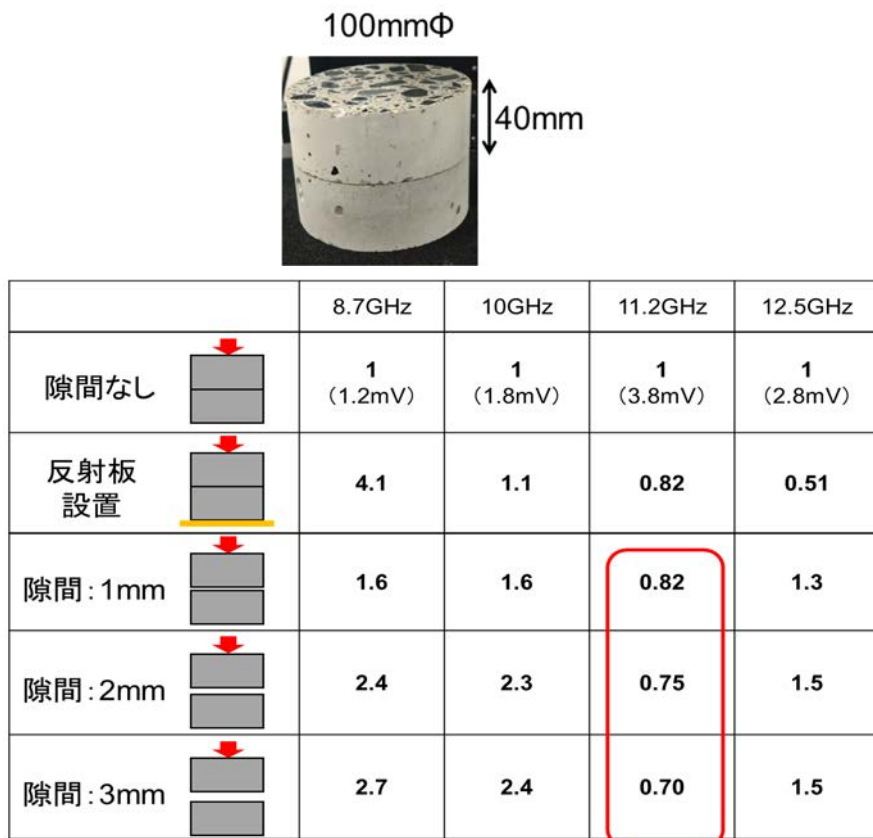
(a) 偏光方向とひび割れ方向が平行 (b) 偏光方向とひび割れ方向が垂直  
 図 3.2.1-1 試験体のひび割れ幅とサブテラヘルツ波の透過及び反射の関係

(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、図 3.2.1-2 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 mm 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同様な測定を行い（図 3.2.1-3）、いずれの測定周波数でも表面から 45 mm 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。



(上) コア抜きサンプル画像 (下) 各条件における反射率  
 図 3.2.1-2 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

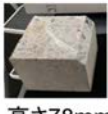
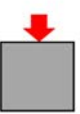




	8.7GHz	10GHz	11.2GHz	12.5GHz
 高さ78mm 	1	1	1	1
 高さ78mm 反射板設置 	0.63	1.46	0.35	0.52
 高さ88mm 幅1mm 	0.25	0.41	0.72	0.65

図 3.2.1-3 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

## 【令和4年度実施内容及び成果】

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は、亀裂を模擬するスリットと鉄筋を内部に含む12種類ある。亀裂はかぶり10 mmの位置に深さ方向15 mmに形成し、幅のパラメータとしては3 mm、1 mm、0.5 mmの3水準としている。10 mmのかぶり深さの半分に対応する5 mm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3.2.1-4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 mm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 mm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。

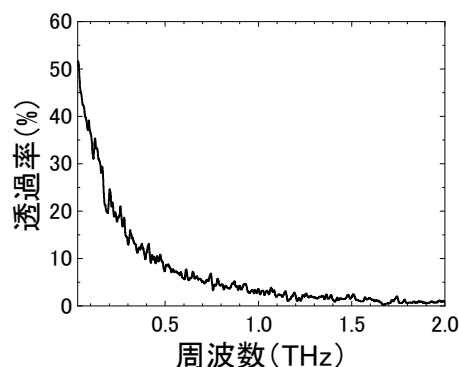


図3.2.1-4 コンクリート試験体の透過率測定結果（コンクリート膜厚：5 mm）

幅3 mm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3.2.1-5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ため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高い。屈折率の違いが反射率に反映することで、亀裂幅3 mm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 mmまで狭くなると13.6 GHzにシフトすることが図3.2.1-6で見取れる。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 mmであり、波長に対する亀裂のサイズはおおよそ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 mm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  $\mu\text{m}$ 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 mm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。

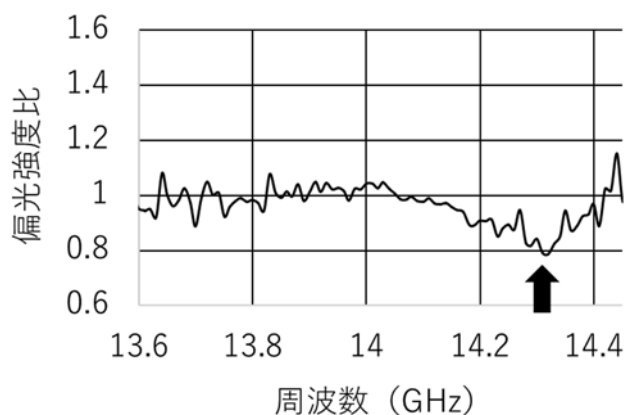


図 3.2.1-5 スペクトルの偏光強度比（亀裂の幅：3 mm）

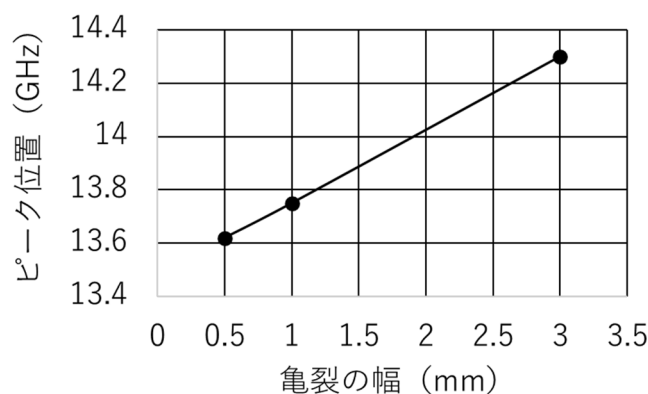


図 3.2.1-6 亀裂の幅による偏光強度減衰位置の変化

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 3.2.1-4 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 3.2.1-7 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 3.2.1-8 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。

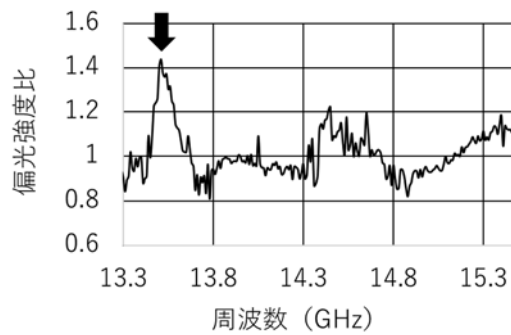


図 3.2.1-7 スペクトルの偏光強度比 (かぶり深さ : 10 mm)

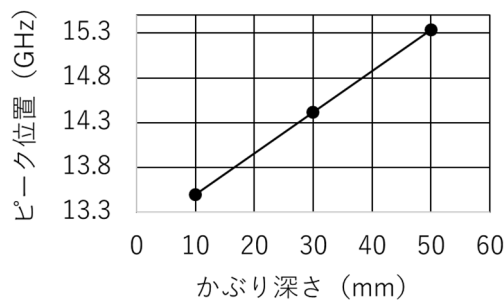


図 3.2.1-8 かぶり深さによる偏光強度ピーク位置の変化

図 3.2.1-9 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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  及び  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の反射スペクトルを示す。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  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  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  はヘマタイトと呼ばれる赤さびの成分である。

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  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、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  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 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) とマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 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 3.2.1-10 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。



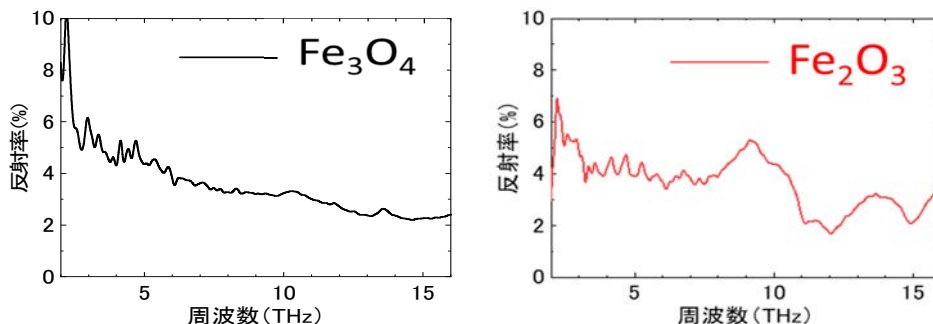


図 3. 2. 1-9 テラヘルツ周波数帯における鉄酸化物の反射スペクトル

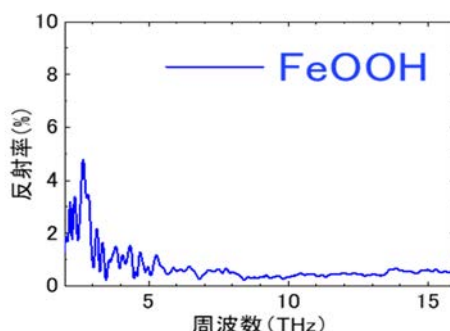


図 3. 2. 1-10 テラヘルツ周波数帯における鉄水酸化物の反射スペクトル

図 3. 2. 1-11 は鉄酸化物の組成を  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  と異なるものである。86.5 GHz 付近で  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  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。

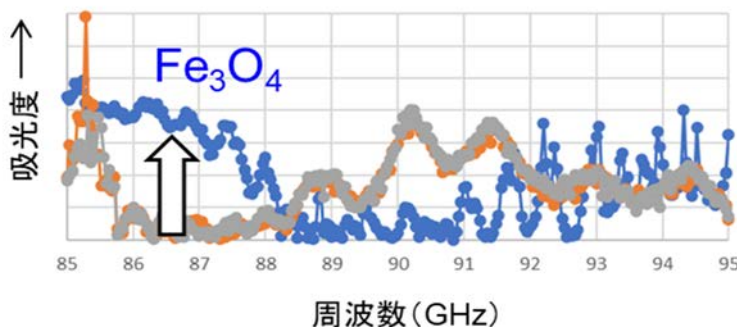


図 3. 2. 1-11 鉄酸化物を  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  に調製した時の吸収スペクトルの変化

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 3.2.1-12 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。

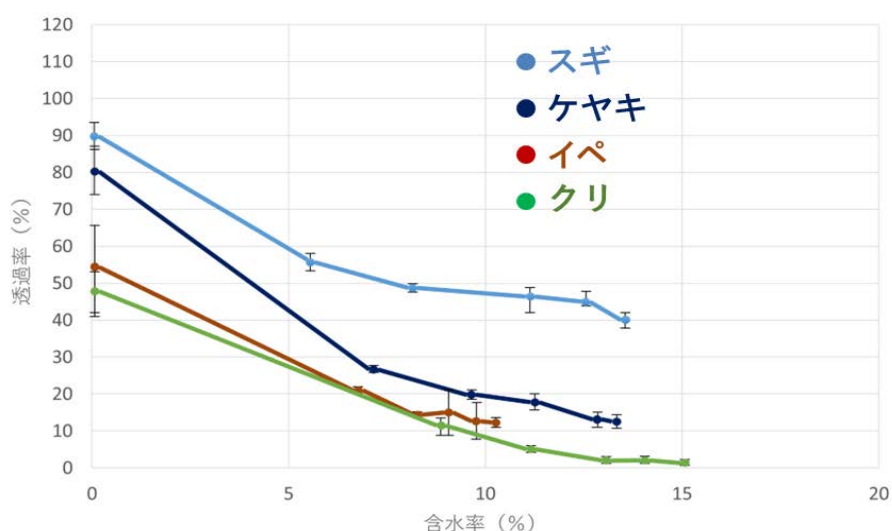


図 3.2.1-12 含水率が異なる木材の透過率 (63.5 GHz)

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4年度）

【令和3年度までの実施内容及び成果（概要）】

(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。

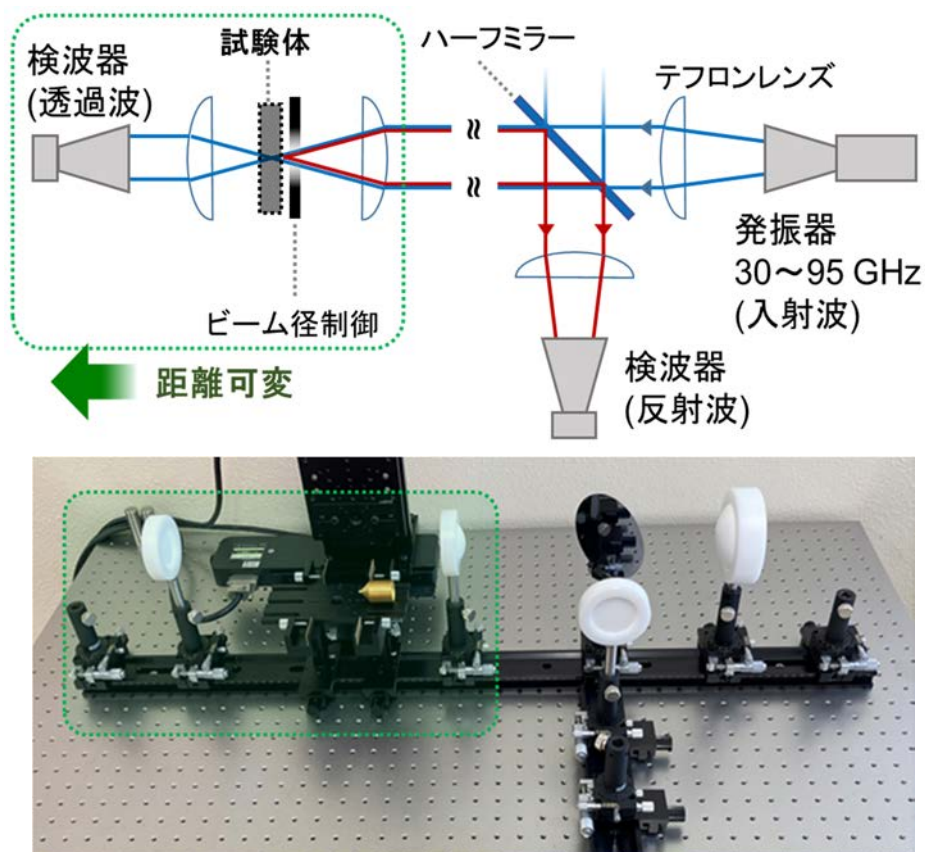


図3.2.2-1 遠隔診断を志向した光学系の模式図（上）と外観（下）

(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 年度実施内容及び成果】

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、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。

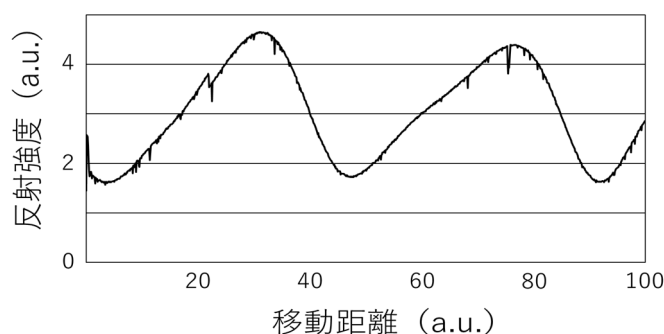
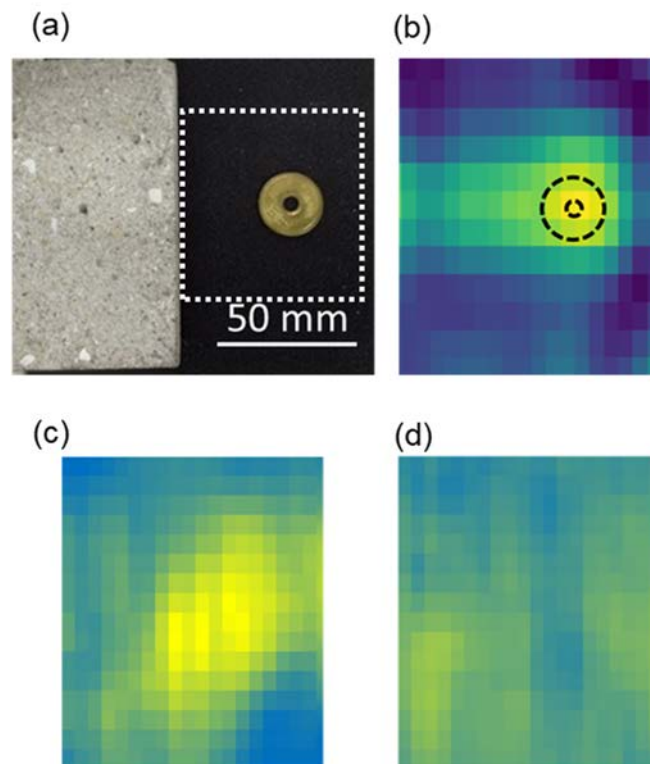


図 3.2.2-2 遠隔測定系においてサブテラヘルツ光源に対する試験体の各距離における反射強度

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。



(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

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

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) の反射率と透過率変化を図 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。

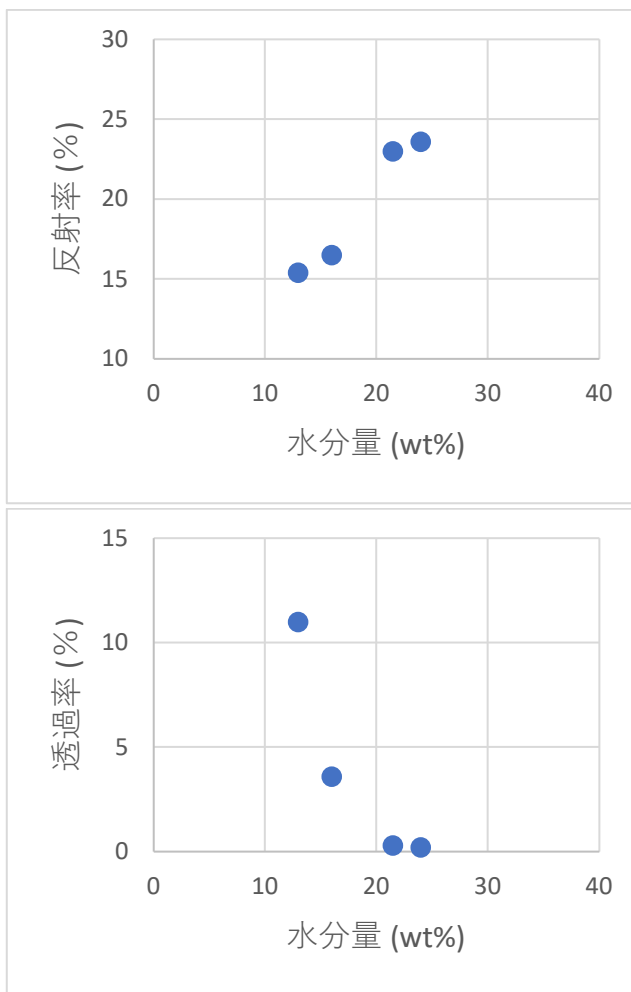


図 3.2.2-4 コンクリート試験体におけるペースト部の水分量を変化させた試料に対する 60 GHz の反射率と透過率変化

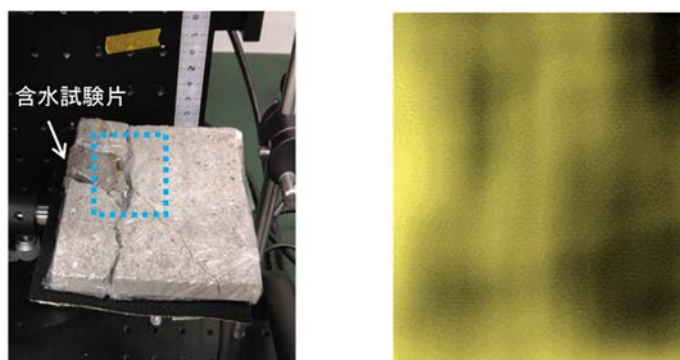


図 3.2.2-5 含水試験片を含む試験体画像（左）と反射率の分光イメージング（右）

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  $\alpha$ -FeOOH、 $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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。

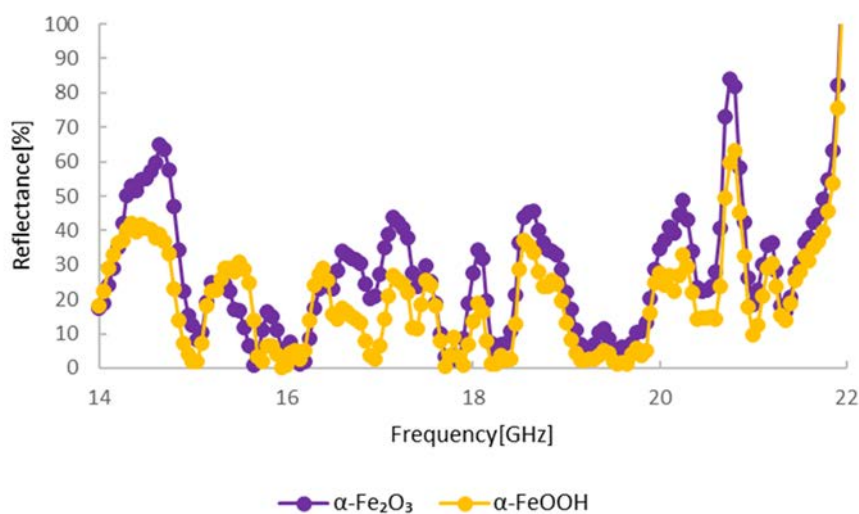
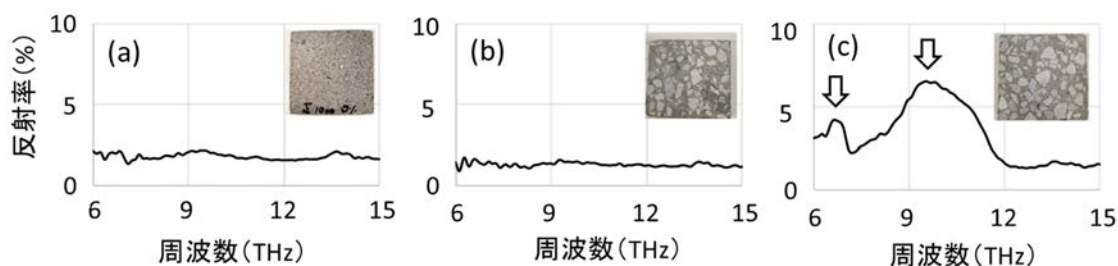


図 3.2.2-6 金属腐食生成物  $\alpha$ -FeOOH、 $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の反射率スペクトル

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/テラヘルツ波	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)	×	×	-



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4年度)

【令和3年度までの実施内容及び成果(概要)】

(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 s/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。

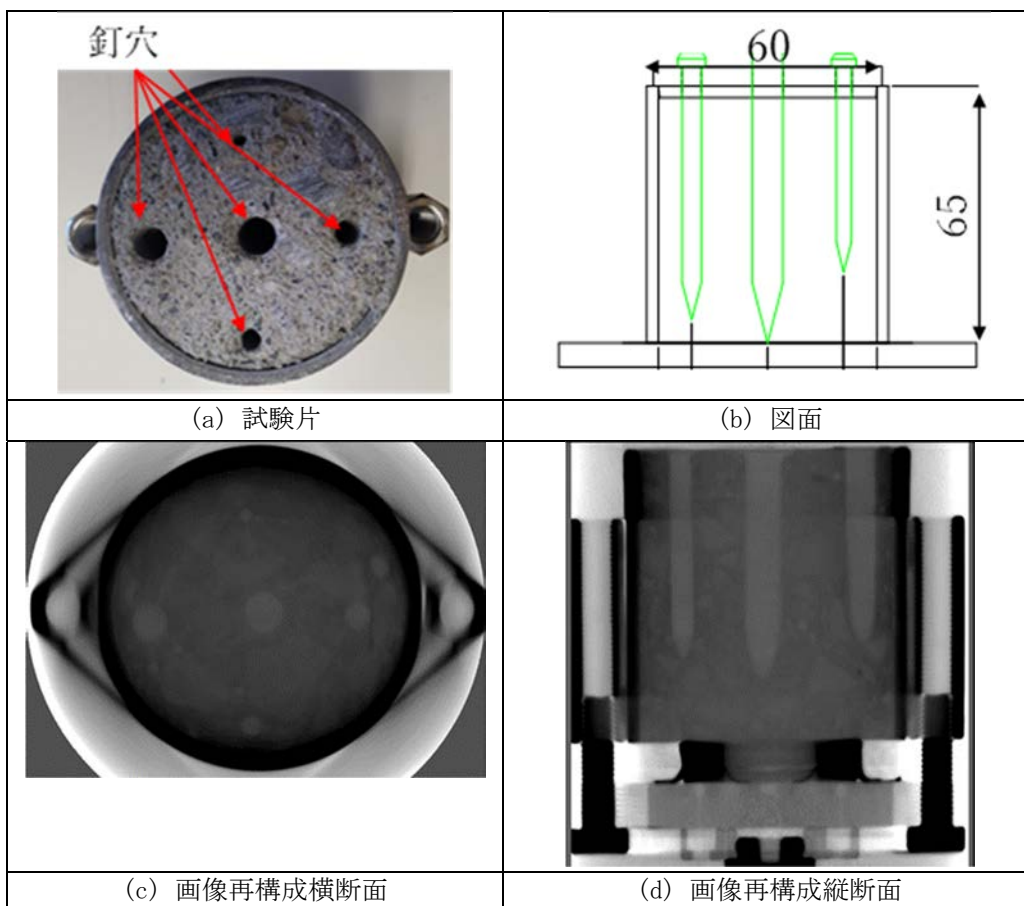


図3.2.3-1 試験条件決定に用いた試験体の図と測定結果

(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の円柱形を基本のブロックに、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 種類の一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。

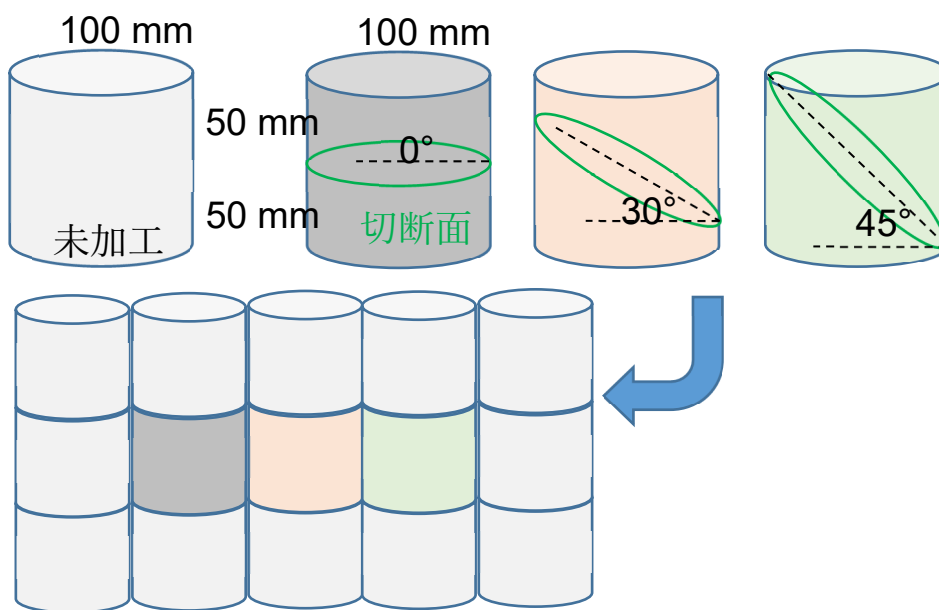


図 3.2.3-2 RC 模擬試験体の仕様の概念図

### (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 年度実施内容及び成果】

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。

- 測定条件：0.75 s/0.3° /枚×600 枚
- 測定時間：1 時間で測定完了
- 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) き裂を導入した試験体
- 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 試験体

図 3.2.3-4 に、画像再構成により取得した 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。

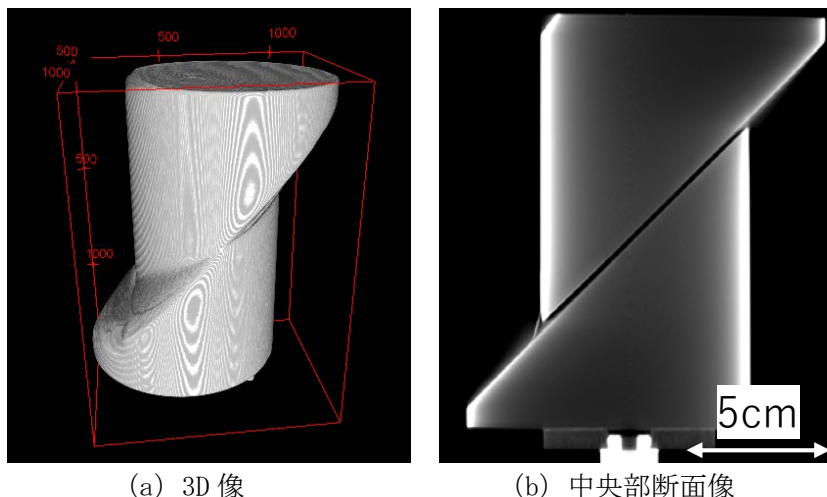


図 3.2.3-4 45° でカットした試験体の 3D 像 (a) 及び中央部断面像 (b)

(2) き裂を導入した試験体

図 3.2.3-5 に  $\phi 100$  mm $\times$ 50 mm 厚のコンクリートを 600 °C で熱処理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、いたるところに幅 1 mm 程度のき裂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、mm オーダーの幅のき裂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。

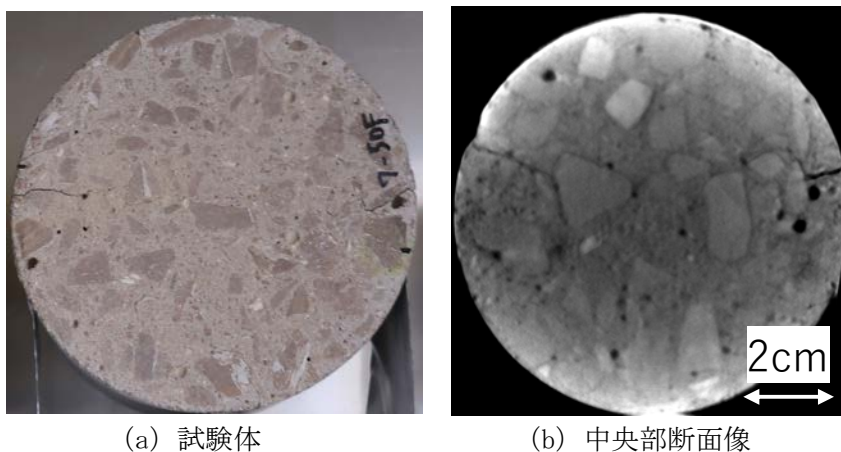
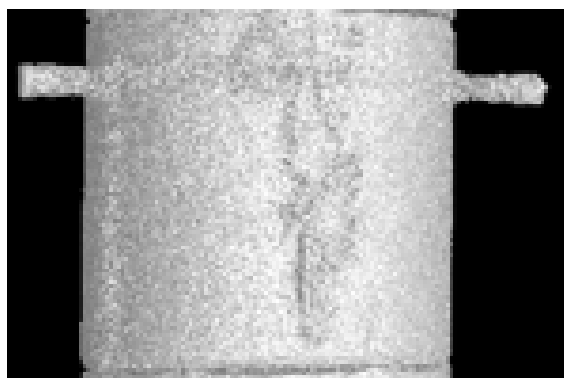


図 3.2.3-5 き裂を導入した試験体 (a) 及び中央部断面像 (b)

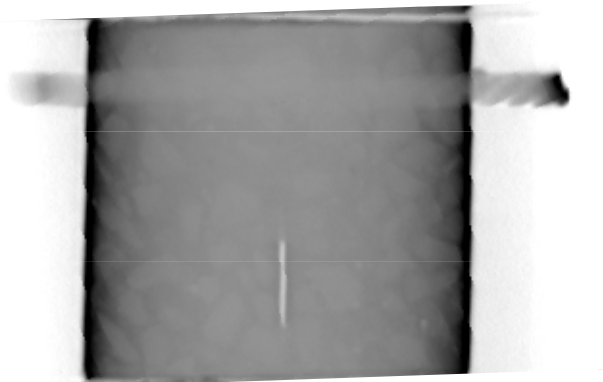
(3) 鉄筋を入れた試験体

図 3.2.3-6 に  $\phi 5$  mm の鉄筋を横串した  $\phi 50$  mm $\times$ 50 mm 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 mm、高さ 10 mm 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 $\phi 10$  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 (a) 及び中央部断面像 (b)

#### ※ まとめ

##### (1) テラヘルツ波イメージング技術の開発

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。

##### (2) サブテラヘルツ波イメージング技術の開発

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。

##### (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

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。

斜め  $45^\circ$  にカットし約 2 mm の模擬スリットを作った試験体では、平均 1.9 mm の隙間を算出できた。また  $600^\circ\text{C}$  で熱処理した試験体では、幅 1 mm 程度のき裂が観察できた。 $\phi 5$  mm 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  $\phi 10$  mm 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。

### 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4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4年度)

##### 【令和3年度までの実施内容及び成果 (概要)】

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アルミ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・力学的作用によって生じるひび割れなどの力学特性の低下を伴う劣化を導入したコンクリート試験体に対し、サブテラ/テラヘルツ波イメージング技術による測定を行う。この測定結果から、劣化の状態とコンクリートの各種力学特性の関係を取得できるような関係として整理し、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 解析に適用できる力学特性を取得することを目的とする。また、カメラを利用した計測の高速化についても検討を行う。

#### (2) 予備実験

実験に当たって、サブテラ/テラヘルツ波の基礎特性を調査するための予備実験を行った。一般に、電磁波は周波数が大きくなる (波長が短くなる) ことで分解能が向上する一方、減衰が大きく透過性が小さくなる。ここでは、1F 建屋で想定されるコンクリートのかぶり厚さとして少なくとも 30 mm を想定し、この厚さを透過して情報の取得が可能なサブテラ/テラヘルツの周波数を確認する予備実験を行った。

ここで用いたサブテラヘルツ測定系を図 3.3.1-1 に示す。実構造物への適用を考慮し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ではなく、片側に設置できる反射波による測定系を用いた。サブテラ/テラヘルツ波の光源は、透過性の大きいサブテラヘルツ周波数 (0.03 THz = 30 GHz) から始めて段階的に大きくし、計測可能な範囲を確認した。試験体として、かぶり厚さを模擬したコンクリート (厚さ 5、10、20 mm) の裏面に鉄筋を想定した金属を貼り付けたものを使用した。

図 3.3.1-2 に測定結果を示す。周波数 0.03 THz (30 GHz) を用いた計測では、厚さ 20 mm までにおいて、図中に破線で示した埋設金属を比較的明瞭に識別することができる。この一方で、周波数 0.05 THz (50 GHz) を用いた計測において、厚さ 10 mm の埋設金属

の判別が困難である。すなわち、周波数を 0.05 THz (50 GHz) より大きくした場合には、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予想される。この予備実験の結果から、3.3節の以下の検討では周波数を 0.05 THz (50 GHz) 以下としたサブテラヘルツ波を用いた計測を行うこととする。

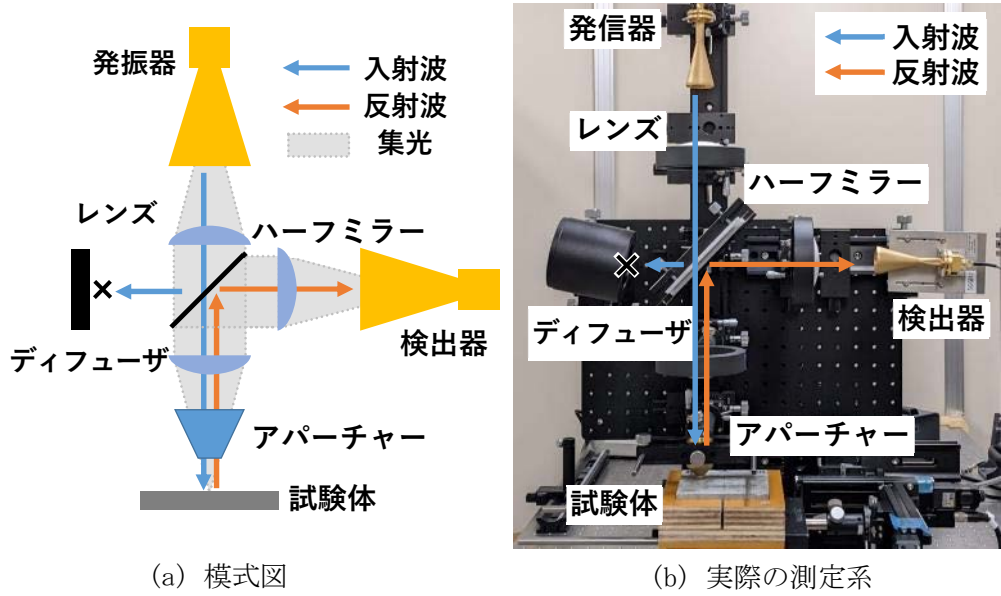


図 3.3.1-1 測定系概要

図中の破線は裏面金属片位置

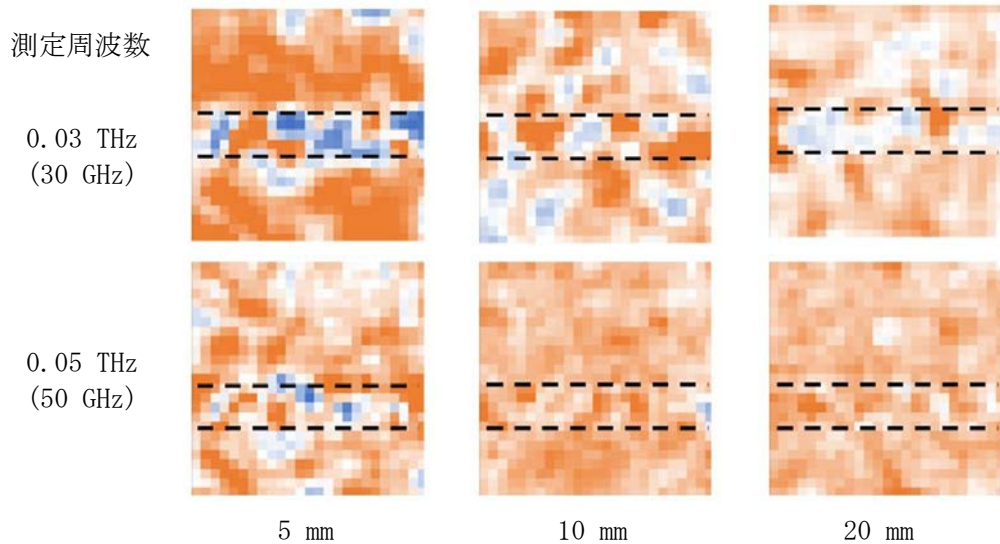


図 3.3.1-2 サブテラ/テラヘルツの測定可能深さの確認

(3) 実験概要

① 試験体概要

ここでは、大きく 2 つに分類される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。1 つは令和 3 年度に作製した高温加熱により力学特

性を低下させたコンクリート試験体（実験 1）であり、もう 1 つは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（実験 2）である。

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<sup>3</sup>、比表面積 3140 cm<sup>2</sup>）を用いた。細骨材には、砕砂（表乾密度 2.66 g/cm<sup>3</sup>）及び陸砂（表乾密度 2.62 g/cm<sup>3</sup>）を混合して用い、粗骨材には碎石（表乾密度 2.68 g/cm<sup>3</sup>、最大寸法 20 mm）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<sup>3</sup>）を使用した。表 3.3.1-1 に用いた調合表を示す。

実験 1 では、直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱状試験体を用い、サブテラヘルツ計測では厚さ 50 mm に切断したものを使用した。実験 2 では、2 種類の形状の異なる試験体として、円柱状（直径 50 mm、高さ 100 mm（以下、「円柱試験体」という。)) 及び立方体（100 mm 角（以下、「キューブ試験体」という。)) を新たに作製して用いた。

表 3.3.1-1 調合表

	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
実験 1	168	306	790	1053	1.38
実験 2-1	168	258	819	1119	2.58
実験 2-2	172	344	851	912	1.03

## ② 劣化の導入

### 1) 実験 1・高温加熱試験

高温加熱を受けたコンクリートにはひび割れが生じる。これは、高温加熱を受けるコンクリート中のセメントペーストの水和物の脱水や分解による収縮と、岩石の熱膨張の体積変化の差異から内部応力が増加することにより発生する。このため、高温加熱によるコンクリートの力学的性質の低下は、セメントペーストの化学的な変質とひび割れの発生が主たる要因として考えられる。実験 1 では、加熱温度を 300、600、900 °C の 3 水準とし、これらの温度を 24 時間保持した後に降温させた状態で以降の実験を行った。

### 2) 実験 2・急速凍結融解試験

実験 2 では、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生じさせることを目的として、凍結融解試験を採用した。この方法には、実験 1 と同様にコンクリートに（微細な）ひび割れを与えることで損傷を与えるものであるが、セメントペースト部分に大きな変質を生じさせずに、サイクル数に応じて損傷の程度をコントロールできることに利点がある。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には、1 サイクルあたり約 4 時間を要し、劣化が顕在化するまでには 100 サイクル以上を与える必要があることも通常である。また、一般的に用いられている AE コンクリートの場合には、300 サイクル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以上に亘る長期間が必要となる。

そこで、実験 2 では液体窒素を用いた、急速凍結融解試験を採用する。既往の研究<sup>[3.3.1-1]</sup>では、AE 剤を使用したコンクリートであっても、10 サイクル程度の急速凍結融解試験によって、相対動弾性係数を 60 % 程度に減少させることができている。このように、従来の凍結融解試験と比較し、短時間でコントロールされた損傷を与えることができる。



急速凍結融解試験に用いた装置を図 3.3.1-3 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、ここに液体窒素を溜めることで、コンクリート試験体を極低温（試験体中心部が円柱試験体では $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度、キューブ試験体では $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度）まで急速に冷却するものである。その後、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温水中に試験体を投入して融解させて1サイクルとした。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一次共鳴振動数を求め、相対動弾性係数を求めるとともに、サブテラヘルツ計測を実施した。



図 3.3.1-3 急速凍結融解試験装置

### ③ 力学特性の確認実験

力学特性について、実験 1・2 とも圧縮強度試験を行って圧縮強度を取得した。円柱状の試験体を使用する場合には、コンプレッソメーターを用いて圧縮载荷中の試験体のひずみを測定し、静弾性係数を算出した。静弾性係数は 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。圧縮強度、静弾性係数ともに試験体3体の平均値として計算した。载荷速度は、JIS A 1108 では毎秒 $0.6\pm 0.4\text{ N/mm}^2$ 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となるため、毎秒 $0.2\text{ N/mm}^2$ で制御した。

### 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 3.3.1-1 に示すものと同様の反射波によるものである。サブテラヘルツ波の光源には、予備実験の結果を踏まえて実験 1 では $30\text{ GHz}$ 、 $50\text{ GHz}$ の固定周波数を用いた。実験 2 では可変周波数に対応する光源を用いて、 $20\sim 50\text{ GHz}$ の周波数から離散的に $5\text{ GHz}$ ごとの周波数を用いた。

計測系は、この光源のほかにサブテラヘルツ波の集光・平行光の変換に用いるレンズ、サブテラヘルツ波を検出器に向けるハーフミラー、試験体の直前に設置して焦点の合う光のみを取り出すアパーチャー、ハーフミラーにより検出器と反対方向に反射されたテラヘルツ波を吸収するディフューザなどから成る。また、試験体は2軸ステッピングモータにより制御されるステージ上に設置した。試験体を水平面の $x$ 軸 $y$ 軸の2方向に動作させ、2次元測定を実施した。測定データには、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）を引いた値を金属板の反射強度で除した反射率を用いた。この測定各点における反射率をプロットしたコンタ図を作成（イメージング処理）した。

(4) 実験結果

① 実験 1

図 3. 3. 1-4 に加熱温度と圧縮強度及びヤング係数の関係をそれぞれ示す。加熱温度が高くなるほど圧縮強度、ヤング係数ともに減少する傾向が確認された。

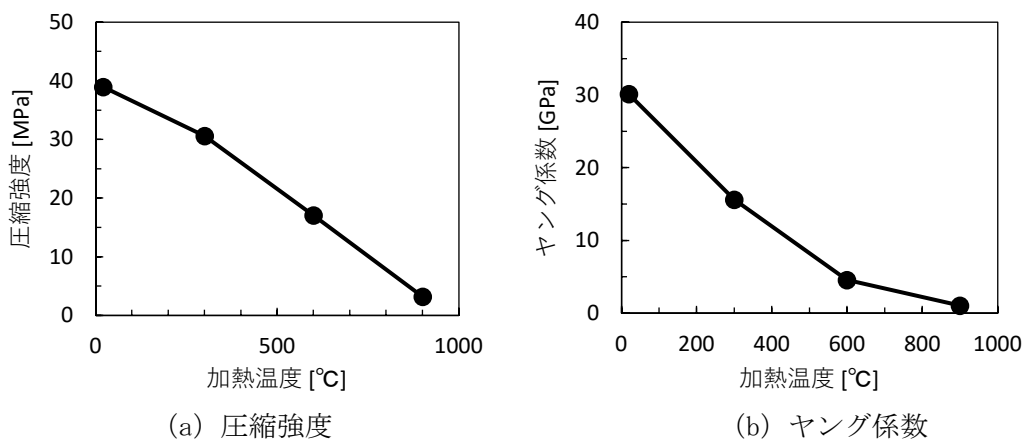


図 3. 3. 1-4 加熱温度と力学特性の関係

図 3. 3. 1-5 に、300 °C、600 °C、900 °C で加熱した試験体のサブテラヘルツ反射波による測定結果について、周波数を 30 GHz とした場合の 1 例を示す。300 °C 加熱の前後では、測定画像の変化はほとんど変化は見られない一方で、600 °C、900 °C の場合には加熱前後で青色の反射率の低い領域が増加する傾向が確認できた。図 3. 3. 1-6 に、加熱前後の平均反射率の比と圧縮強度の残存率の関係を示す。圧縮強度の残存率は加熱を行わない 20 °C の圧縮強度を基準に算出した。この図から分かるように、周波数 30 GHz では、300 °C 加熱により生じた 2 割程度の強度低下は検出できていないが、それ以上の強度低下については、加熱前後の反射率の比の低下として検出できている。また、図 3. 3. 1-7 に、加熱前後の平均反射率の比と圧縮強度及びヤング係数の低下率の関係を示す。ここで、力学特性の低下率は加熱を行わない 20 °C の圧縮強度を基準に算出した。このように、サブテラヘルツ反射率の変化率から力学性能の低下率を定量的に換算できる可能性が示唆される。ただし、ここでの計測は最高温度をパラメータとした高温加熱試験により力学性能を変化させた試験体で得られたもので、セメントペースト部分の化学的な変質や、力学性能の変化率は離散的なものに限定されている。そのため、実験 2 として、より段階的な性能の変化として計測を行い、本結果の妥当性を検証する。

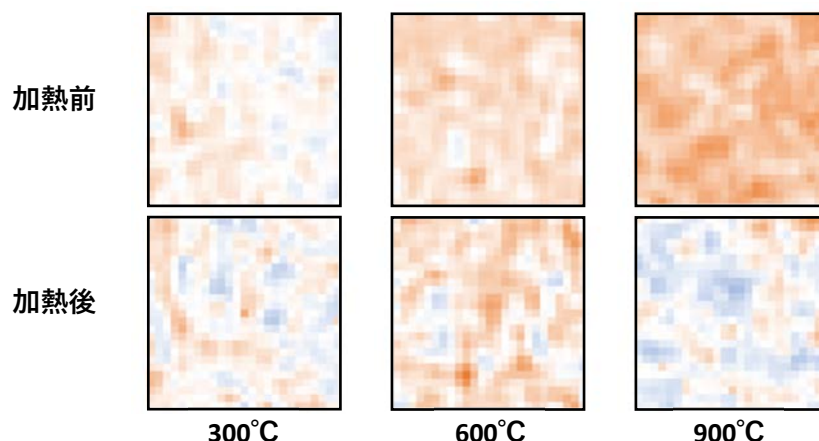


図 3.3.1-5 加熱温度ごとのサブテラヘルツ画像

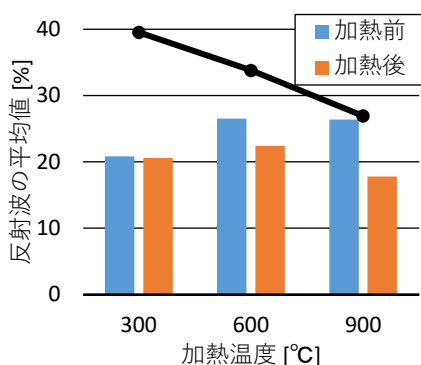


図 3.3.1-6 加熱温度と反射率の関係

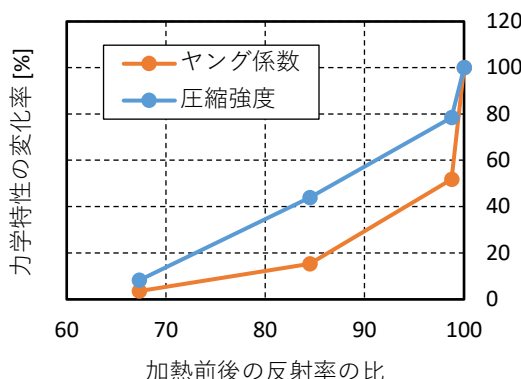


図 3.3.1-7 反射率比と力学特性の関係

② 実験 2

図 3.3.1-8 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。この図のように、段階的な力学特性の変化（低下）を与えることが可能であることが確認できた。図 3.3.1-9 には、急速凍結融解試験前後のキューブ試験体の写真とサブテラヘルツ波イメージングデータ技術によるひび割れ量の測定を示す。損傷の進展に伴って、反射率が減少している傾向が確認できる。図 3.3.1-10 に、円柱試験体から得られたサブテラヘルツ反射率比と力学特性（圧縮強度及びヤング係数）の変化率の関係を示す。サブテラヘルツ反射率比及び力学特性の変化率のいずれも、実験 1 と同様に初期状態（0 サイクル）で得られた値を 100 %として算出している。なお、サブテラヘルツ反射率比については、適切なキャリブレーションとするために特定の一点の測定値を用いるのではなく、面データとして得られたものの平均値とすることを基本とし、極端な外れ値を除いて算出した。このことにより、試験体の全体の物性変化を表すマクロな情報として、サブテラヘルツ反射率比を取得できると考えられる。圧縮強度とヤング係数のいずれも損傷が生じたことにより低下しており、これに対応してサブテラヘルツ反射率も低下している。図中には、指数関数で近似したサブテラヘルツ反射率比と圧縮強度及びヤング係数の変化率の関係式を示す。このように、サブテラヘルツ反射率比から力学特性の変化率

を算出する方法を提案式として示すことができる。圧縮強度比と比較して、ヤング係数比は損傷の初期段階から低下の幅が大きい。これは、微細なひび割れが存在する場合に変形が生じやすくなるためであり、ひび割れ発生メカニズムが実験1で採用した高温加熱と全く異なる場合でも、同様の現象が見られる。サブテラヘルツ反射率についても、ひび割れの存在によりコンクリート試験体内部での屈折や減衰が生じることで、計測される値が減少したものと考えられる。

以上の結果から、サブテラヘルツ反射率比を計測することにより、圧縮強度比・ヤング係数比の力学特性の変化率を上述の提案式を用いた定量的な関係として推定可能であると示唆される。ただし、本検討の範囲内では調合・材料・試験体形状など諸条件は限定的であるため、ここで示した提案式は暫定的なものであり、今後検討範囲を拡大することで、より一般的な関係を得られるよう必要に応じて改定される場合がある。

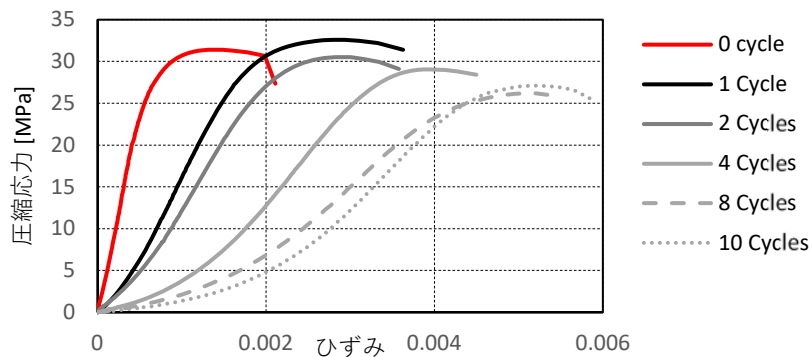


図 3. 3. 1-8 急速凍結融解試験サイクルごとのコンクリートの力学特性

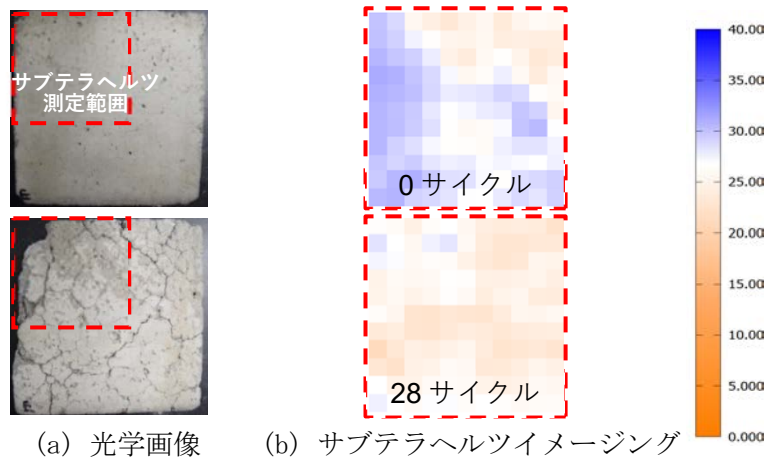


図 3. 3. 1-9 急速凍結融解試験前後の試験体

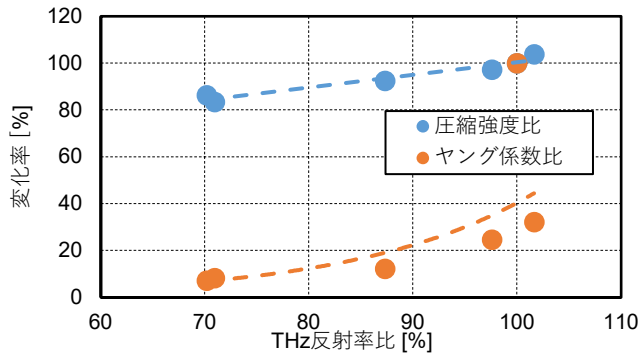


図 3.3.1-10 サブテラヘルツ反射率比と力学特性の関係 (円柱試験体)

(5) カメラ化による高速計測

ここまでの実験で使用した測定系を、測定現場への持ち込みをより簡便にし、リアルタイムでのモニタリングが可能になると期待されるサブテラヘルツカメラを利用した測定についても検討した。ここでは、ひび割れを模擬した試験体を対象とした基礎的検討について述べる。測定系の概要を図 3.3.1-11 に示す。ここまでの実験と同様に、サブテラヘルツ反射波による測定を採用し、光源は実験 2 で用いたものと同様である。サブテラヘルツカメラには、256 個の受信素子が平面的に配置されており、面的な測定によって広範囲の測定とリアルタイムでのモニタリングが期待できる。ただし、実験 1・2 とは異なり相対的な反射率の計測のみで定量的な反射率の測定には制限がある。

ひび割れを模擬したスリットを持つコンクリート試験体に対して走査計測を行った結果を図 3.3.1-12 に示す。スリットを含まない試験体ではほぼ一律の反射率が計測された一方で、スリットを含む試験体の走査では、50 GHz において 2.5 mm 幅のスリットまで検出可能であることが確認できた。試験体サイズである 40 cm の距離を、約 20 s 以内に走査可能であった。このように、カメラを用いた測定系の小型化・軽量化により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。

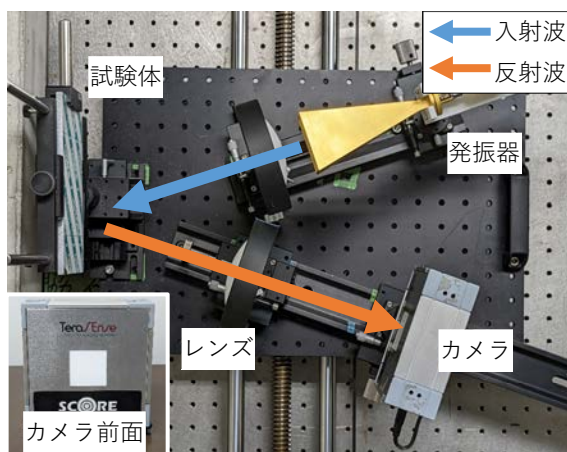


図 3.3.1-11 カメラを用いた測定系の概要

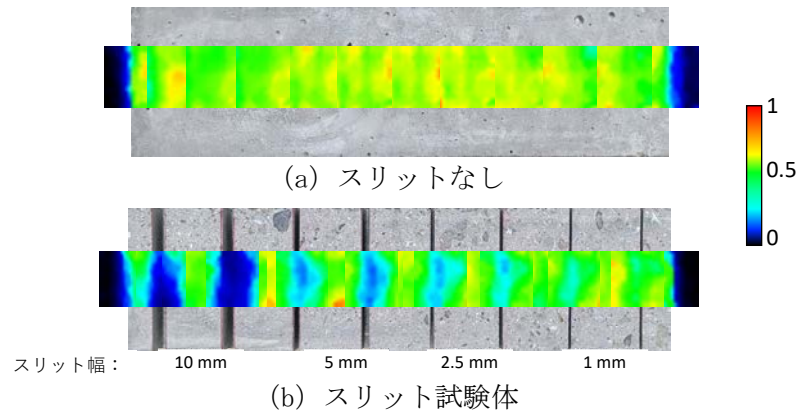


図 3.3.1-12 カメラを用いたスリット（模擬ひび割れ）の測定結果

### 3.3.2 鉄筋腐食と付着不良・剥離など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4年度）

#### 【令和3年度までの実施内容及び成果（概要）】

鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価として、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て含水状態を調整した試験体の観察を行った。

- 導入欠陥は塩橋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年度実施内容及び成果】

##### (1) はじめに

ここでは、鉄筋腐食と付着不良・剥離など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う。これらの結果より、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解析に適用できる力学特性（一体性）の低下を取得することを目的とする。

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する。

##### (2) RC試験体概要及び計測方法

###### ① 試験体概要

###### 1) 試験概要及び水準

表3.3.2-1に鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価のための試験体水準を示す。試験体水準は実験(1)～(3)の3つの構成から成る。

実験(1)は令和3年度に作成した試験体を用いて検討する。鉄筋腐食によって発生したひび割れ幅(0 mm、0.1 mm、0.3 mm、2.0 mm、2.2 mm)をパラメータとし、腐食グレード(内部ひび割れによる発生状況)の異なるRC試験体を用いて、付着強度試験から引き抜き時の力学特性(一体性)を整理する。また、RCの力学特性(一体性)低下は鉄筋に沿うひび割れによって低下するため、かぶり厚さとひび割れ幅をパラメータとした水準によって検討する。かぶり厚さは1 cm、3 cm、5 cmの3水準、ひび割れ幅は0 mm、1 mm、3 mm、5 mmの4水準とし、計12水準

の組み合わせとする。この試験体を対象にサブテラヘルツ波イメージングの測定を行い、ひび割れ幅とサブテラヘルツ波イメージング技術から得られた反射率の整理を行う。この2つの測定から腐食グレード（内部ひび割れによる発生状況）による腐食グレードと引き抜き時の力学特性（一体性）との関係について評価する。

実験(2)では、鉄筋腐食に関連するコンクリートの含水率について、サブテラヘルツ波イメージング技術による含水率の評価方法を提案するため、試験体形状や含水率（状態）の調整方法の水準とした試験体を作製し、検討する。

実験(3)では、課題 3.3.3 の FEM 解析条件を踏まえて決定したひび割れ幅（ひび割れなし、50 mm、100 mm、200 mm）とひび割れ長さ（0.5 mm、1 mm、3 mm）の組み合わせからなる水準とし、計 10 水準の試験体を作成する。この水準に対し、付着劣化特性（一体性）の測定（付着強度試験）とサブテラヘルツ波イメージング技術による測定を行う。さらに、局所的に含水率を変化させた RC 壁試験体を作成し、サブテラヘルツ波イメージング技術による測定結果から含水率（量）を評価するための基礎データを取得する。

表 3.3.2-1 鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価のための試験体水準

作成年度	検討項目	試験体水準				測定項目	
令和3年度	実験(1)	<b>【腐食グレード（内部ひび割れによる発生状況）の異なる RC の試験体水準】</b>				引抜時の力学特性（一体性（付着強度））  サブテラヘルツ波イメージング技術による測定	
		記号	形状(mm)	かぶり厚さ(cm)	ひび割れ幅(mm)		
		付着①	100×100×100 (試験体中央部に D16 埋設)	4	0, 0.1, 0.3, 2.0, 2.2		電食による促進腐食
		1cm	100×100×100	1	0, 1, 3, 5		切断による
		3cm		3	0, 1, 3, 5		
5cm	5	0, 1, 3, 5					
令和4年度	実験(2)	<b>【コンクリートの含水率評価の提案に向けたコンクリートの試験体水準】</b>				サブテラヘルツ波イメージング技術による測定	
		記号	形状(mm)	試験体の質量含水率(状態)	含水率の調整方法		
		□100×t100mm	100×100×100	0.4% (絶乾)、 2.0% (気乾, RH 60% 保管)、 4.3% (湿潤, RH 100% 保管)	恒湿度環境下による調整		
		□200×t30mm	200×200×200	0% (絶乾)、 2.8, 3.0, 4.7, 5.2, 5.7%	厚さ 30 mm で切断し、切断面より吸水		
□200×t50mm	200×200×200	0% (絶乾)、 1.62, 3.5, 5.0, 5.5%	厚さ 50 mm で切断し、切断面より吸水				
令和4年度	実験(3)	<b>【FEM 解析条件を踏まえた腐食グレード（ひび割れ長さとしひび割れ幅）による RC の試験体水準】</b>				付着劣化特性の測定（引抜時の力学特性（付着強度））  サブテラヘルツ波イメージング技術による測定	
		記号	形状(mm)	ひび割れ長さ(mm)	ひび割れ幅(mm)		
		ひび割れなし	150×100×500～800 試験体中央部に D16 を十字に埋設（図 3.3.2-2）	-	-		ポリ塩化ビニル板を埋設し、模擬ひび割れを作成（図 3.3.2-2）
		50-0.5		50	0.5		
		50-1		50	1		
		50-3		50	3		
		100-0.5		100	0.5		
		100-1		100	1		
		100-3		100	3		
		200-0.5		200	0.5		
		200-1		200	1		
		200-3		200	3		
		<b>【含水率を変化させた RC 試験体（壁試験体）の試験体水準】</b>					サブテラヘルツ波イメージング技術による測定
記号	形状(mm)	試験体の含水率(状態)	含水率の調整方法				
コンクリート壁試験体	780×780×150	非注水部 約 3% 以下（気乾状態）	測定背面の削孔及び吸水（図 3.3.2-5）				



## 2) 引き抜き時の力学特性（一体性）及び RC との付着劣化特性の試験体作成方法

腐食グレードは、日本建築学会の鉄筋腐食評価基準グレードでは、腐食グレード 1～5 に分類されている<sup>[3.3.2-1]</sup>。既往研究では、RC 試験体のかぶり厚さ・鉄筋径及び鉄筋腐食によって発生したひび割れ幅から腐食量を推定し、腐食グレードと腐食量の関係性を示唆する検討がなされている<sup>[3.3.2-2]</sup>。また、鉄筋腐食による RC 構造物の力学的作用の低下も示唆されている<sup>[3.3.2-3]</sup>。これらの関係から腐食グレードを腐食量に、さらにひび割れ幅やひび割れ範囲（長さ）に置き換えて評価することで、ひび割れ幅やその範囲から鉄筋腐食による引き抜き時の力学特性（一体性）の低下を検討する。

そこで、本研究の実験(1)は、鉄筋腐食によってひび割れを導入した試験体により、腐食グレード（内部ひび割れによる発生状況）と引き抜き時の力学特性（一体性）の関係を整理した。

実験(3)では、課題 3.3.3 の FEM 解析の条件を踏まえた条件（ひび割れ幅・ひび割れ長さ）を模擬した RC 試験体を作製し、ひび割れ発生領域が付着強度劣化（一体性）の低下に及ぼす影響について整理を行った。

図 3.3.2-1 に実験(1)の RC 試験体の概要を示す。実験(1)は令和 3 年度に作成された試験体を用いた。試験体形状は、図 3.3.2-1(a)に示される 100×100×100 mm とした。埋設される鉄筋は D16 としテフロンシートにより非定着区間を 36 mm 設けた。また、コンクリート断面の拘束条件を模擬するため鉄筋を取り囲むようにφ6 mm のスパイラル筋を設置し形状とした。ひび割れの導入は、図 3.3.2-1(b)に示される直流電源による促進腐食方法によった。図 3.3.2-2 に実験(3)の RC 試験体の概要を示す。試験体形状は 100×150×500～800 mm とした。表 3.3.2-1 に示す付着強度試験の試験体水準につき各 3 本の試験体を作製した。試験体内部で直行する鉄筋（D16）を 2 本埋設した。腐食生成物による鉄筋とコンクリートの付着切れを模擬するため、付着強度試験（載荷方向）の鉄筋について、コンクリート埋設部の鉄筋にテフロンシートを巻き付け、付着切れを模擬した。

また、鉄筋腐食によるひび割れ幅（0.5 mm、1.0 mm、3 mm）及びひび割れ長さ（50 mm、100 mm、200 mm）を模擬するため、表 3.3.2-1 に示す水準の大きさに切断されたポリ塩化ビニル製の樹脂板を腐食鉄筋部両端に埋設し、ひび割れを模擬した。この樹脂板は、フレッシュコンクリートの終結直前に型枠より引き抜き、所定のひび割れを模擬した。

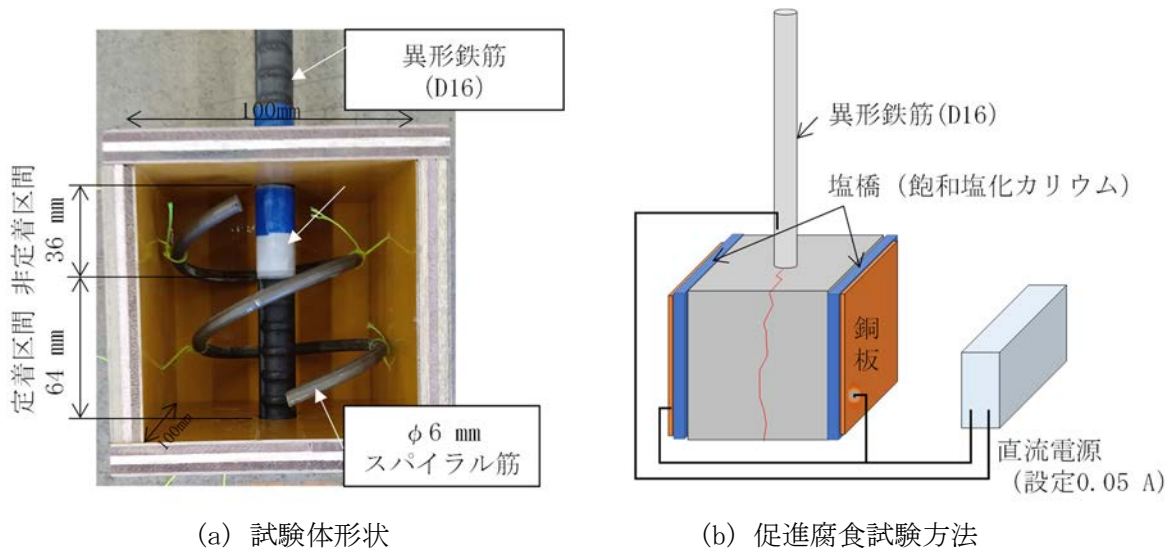


図 3.3.2-1 実験(1)のRC試験体の概要

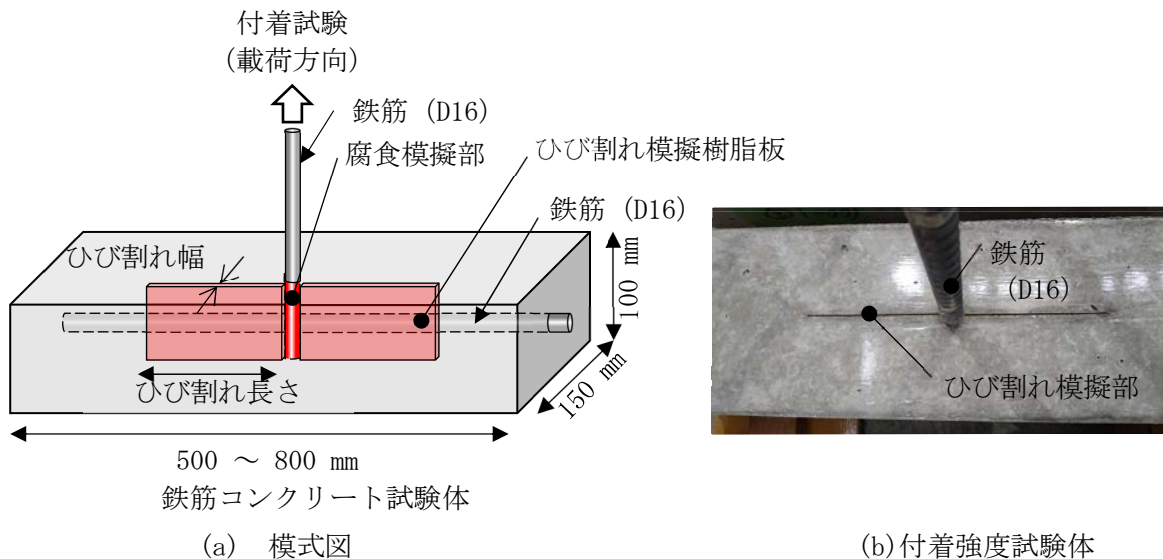


図 3.3.2-2 実験(3)のRC試験体の概要

表 3.3.2-2 に引き抜き時の力学特性（一体性）評価のためのコンクリートの計画調合を示す。水/セメント比は、1F での調合を想定して 55 %の調合とした。コンクリートの練り混ぜには、パン型ミキサー（容量 80 L）を用いて打設した。試験体は材齢 7 日で脱枠し、以降、20 °C環境下にて気中養生を行った。作製した試験体を図 3.3.2-3 に示す。付着強度試験は JSCE-G503-2013 が定める圧縮強度 30 N/mm<sup>2</sup>に達した材齢にて実施した。サブテラヘルツ波測定系による測定は、付着強度試験後の試験体を 105 °C、7 日間の乾燥を行った後、室温と試験体温度が等温になったことを確認の上、測定を実施した。なお、本研究で使用したフレッシュコンクリートの実測値は、スランプ 20.0 cm、空気量 3.9 %となり良好な性状を示した。また、圧縮強度は材齢 7 日で 29 N/mm<sup>2</sup>に達し、材齢 28 日時は 37.3 N/mm<sup>2</sup>であった。

表 3.3.2-2 引き抜き時の力学特性（一体性）評価のためのコンクリートの計画調査

W/C (%)	S/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
55	43	174	317	759	1028

(使用材料)

水 : 上水道水

セメント : 早強ポルトランドセメント (密度 3.14 g/cm<sup>3</sup>)

細骨材 : 大井川水系陸砂 (表乾密度 2.58 g/cm<sup>3</sup>)

粗骨材 : 青梅産硬質砂岩碎石 2005 (表乾密度 2.65 g/cm<sup>3</sup>)



図 3.3.2-3 鉄筋腐食によるひび割れを模擬した付着強度試験体

### 3) 含水率（状態）の評価に向けた試験体の作成方法

鉄筋腐食に関連する含水率の評価方法に関する検討は、表 3.3.2-1 に示す試験体水準とした。試験体は、令和3年度に測定した試験体（高さ 100 mm、幅 100 mm、厚さ 100 mm、記号：□100×t100 mm）に加え、含水率分布がコンクリート表面から深さ方向に発生した影響を検討するため、新たに高さ 200 mm、幅 200 mm、厚さ 200 mm の試験体を作製した。

実験(3)では、RC 部材を対象とした測定結果から含水率（量）を評価するための基礎データを取得するため、高さ 780 mm、幅 780 mm、厚さ 150 mm の RC 壁試験体も作製した。

含水率評価のためのコンクリートの調査計画は、表 3.3.2-3 に示すコンクリートの計画調査とした。使用材料は表 3.3.2-2 と同様である。試験体は打設後 1 日で脱型を行い、材齢 28 日まで水中養生を行った。養生終了後、コンクリートカッター等を用いて試験体厚さが 30、50 mm になるように切断した。切断後、絶乾状態の試験体は、105 °C、1 週間の乾燥を行った。気中状態の試験体は、相対湿度 60 %に調整したデシケーターに静置し、質量変化量が 0.1 %/週に達するまで環境順化を行った。

実験(2)の含水分布の調整は、環境順化させた試験体を対象に図 3.3.2-4 にコンクリート試験体の吸水方法を示すように、約 5 mm の水を張った容器に試験体を 1 日間浸漬させ、切断面より吸水を行った。恒温恒湿室にて環境順化を行い、1 日～数日ごとにサブテラヘル

ツ波測定系による測定を行った。実験 (3) の RC 壁試験体は、図 3.3.2-5 に示すように、サブテラヘルツ波測定系の測定対象面の反対面に 100 mm 間隔で振動ドリルを用いて  $\phi 18 \times$  深さ 100 mm の孔を削孔した。コンクリート壁試験体の削孔箇所に通水を行うことで局所的な含水分布を発生させた。

表 3.3.2-3 含水率評価のためのコンクリートの調合計画

W/C (%)	S/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
50	49.0	172	344	851	912

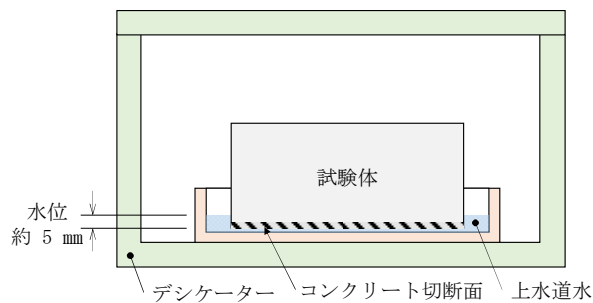


図 3.3.2-4 コンクリート試験体の吸水方法

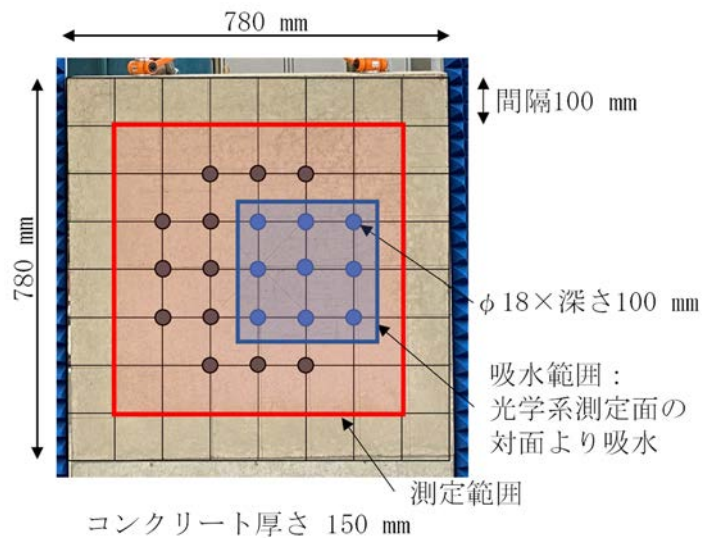
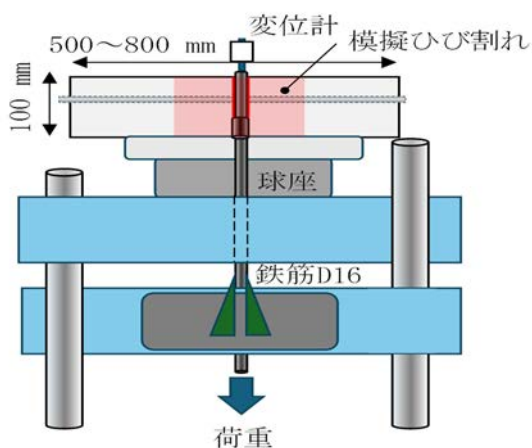


図 3.3.2-5 コンクリート壁試験体の吸水範囲と測定範囲

## ② 測定方法

### 1) 付着試験方法 (引抜時の力学特性 (一体性)、付着劣化特性の評価)

付着試験は、図 3.3.2-6 に示す通り JSCE-G503-2013 によって試験を実施し、株式会社東京測器研究所社製ロガー (TS-960) 及び高感度変位計 (CDP-10) を用いて荷重・変位を計測した。



(a) 模式図

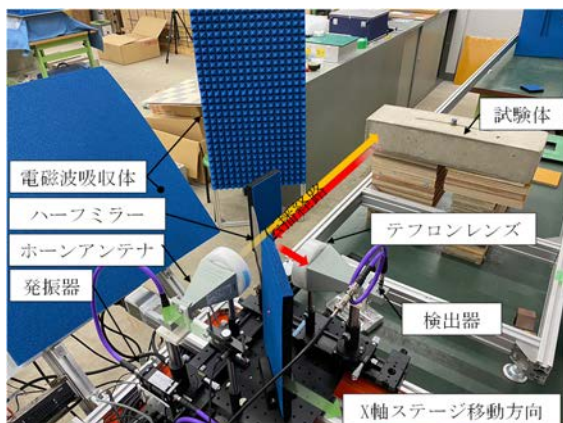


(b) 付着試験実施状況

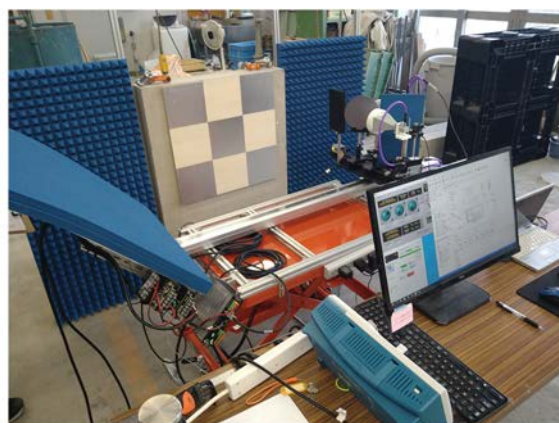
図 3.3.2-6 付着試験方法の概要

2) サブテラヘルツ波測定系装置

図 3.3.2-7 にサブテラヘルツ波測定系の概要を示す。ここでは、実構造物への適用性から、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計測系とした。照射したサブテラヘルツ波が、試験体から戻る反射波を利用した測定系とした。サブテラヘルツ波の光源は 7.5~12.5 GHz の GUNN ダイオードと可変増幅器（最大出力 1 W）を使用して計測した。内部ひび割れの検知の周波数は、課題 3.2.1（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、11.2 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。また、アルミ板を用いた計測を行い、アルミ板の検出強度を基準とした試験体の反射率を求め、比較した。



(a) コンクリート試験体測定状況



(b) RC 壁試験体測定状況

図 3.3.2-7 サブテラヘルツ波測定系装置

(3) 結果及び考察

① 鉄筋腐食による引き抜き時の力学特性（（一体性）、付着劣化特性）とサブテラヘルツ波イメージング

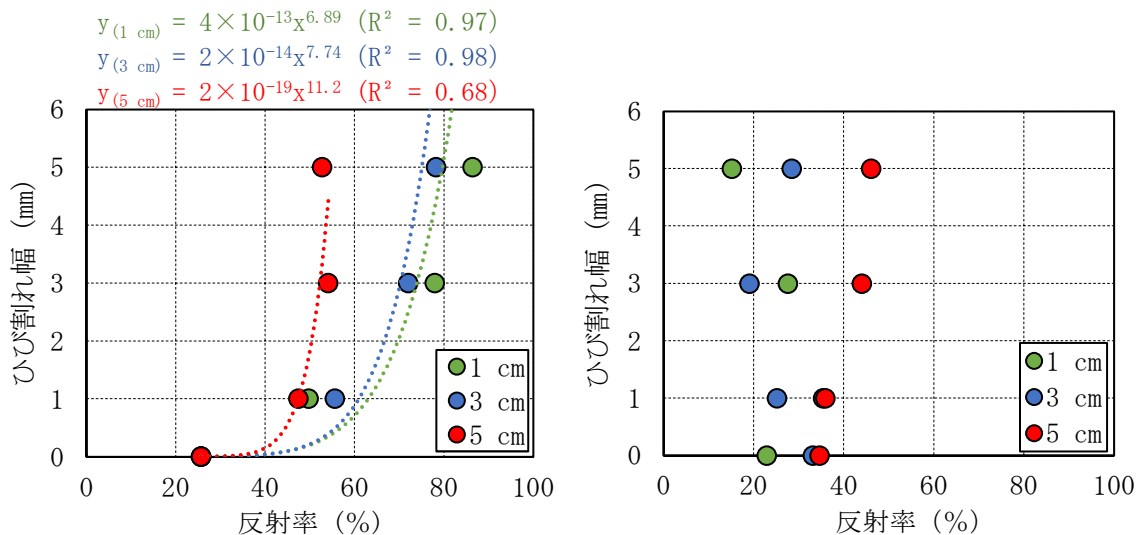
1) 引き抜き時の力学特性（一体性）とサブテラヘルツ波イメージングの整理

実験 (1) の令和 3 年度に作製したかぶり厚さを模擬して切断した 100 mm 角の立方体の試験体に関し、付着強度試験とサブテラヘルツ波イメージングによる測定を行い、腐食グレードによるひび割れ幅と付着強度、そして反射率と付着強度の関係について整理を行った。

図 3.3.2-8 に反射率とひび割れ幅の関係 (絶乾時) を示す。10 GHz では、かぶり厚さによらずひび割れ幅が拡大するとともに反射率も増加する傾向が認められた。一方で 11.2 GHz のかぶり厚さ 3 cm では、ひび割れ幅が拡大するとともに反射率が減少する傾向を示した。また、かぶり厚さ 5 cm は、かぶり厚さ 3 cm とは異なり、ひび割れ幅が拡大するとともに反射率が増加し、10 GHz の結果と類似した結果を確認した。本試験環境では 11.2 GHz より 10 GHz の周波数の方が、かぶり厚さごとの反射率とひび割れ幅の傾向に大きな差はないことから、10 GHz を用いて付着強度と反射強度の整理を行った。

図 3.3.2-9 に、腐食グレードによるひび割れ幅と付着強度 (一体性) の関係を示す。付着強度は最大荷重時の強度を示し、図中に示す数値 (%) は、図 3.3.2-8 に示す近似式より求めた推定反射率である。まず、付着強度はひび割れ幅の拡大とともに付着強度 (一体性) が低下する関係が示された。腐食グレードによるひび割れ幅が付着強度 (一体性) に影響を及ぼし、このひび割れ幅を反射率から推定することで、図 3.3.2-9(b) に示されるような反射率と付着強度の関係が間接的に求められることが分かった。

この関係は、健全時 (ひび割れ幅 0 mm) の付着強度を除いて評価すると、かぶり厚さ 4 cm の時、反射率は約 40~50 % であることから、反射率の低下率によって、付着強度 (一体性) の低下が起き得る領域の推定が可能であると整理できる。

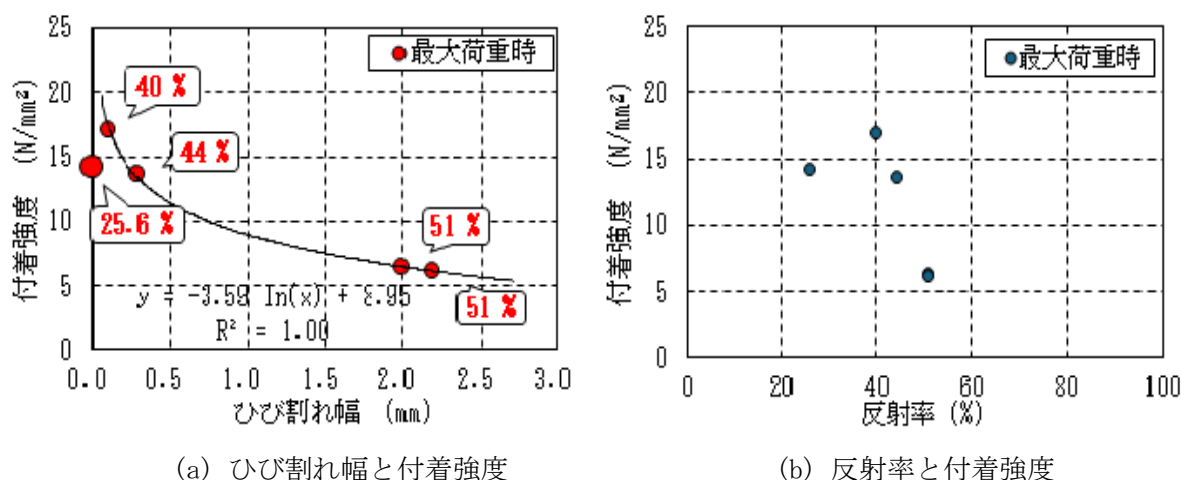


※図中に示す凡例は、かぶり厚さを示す。

(a) 10 GHz

(b) 11.2 GHz

図 3.3.2-8 反射率とひび割れ幅の関係 (絶乾時)



※図中に示す%は図 3.3.2-9 に示す近似式より求めた反射率である。

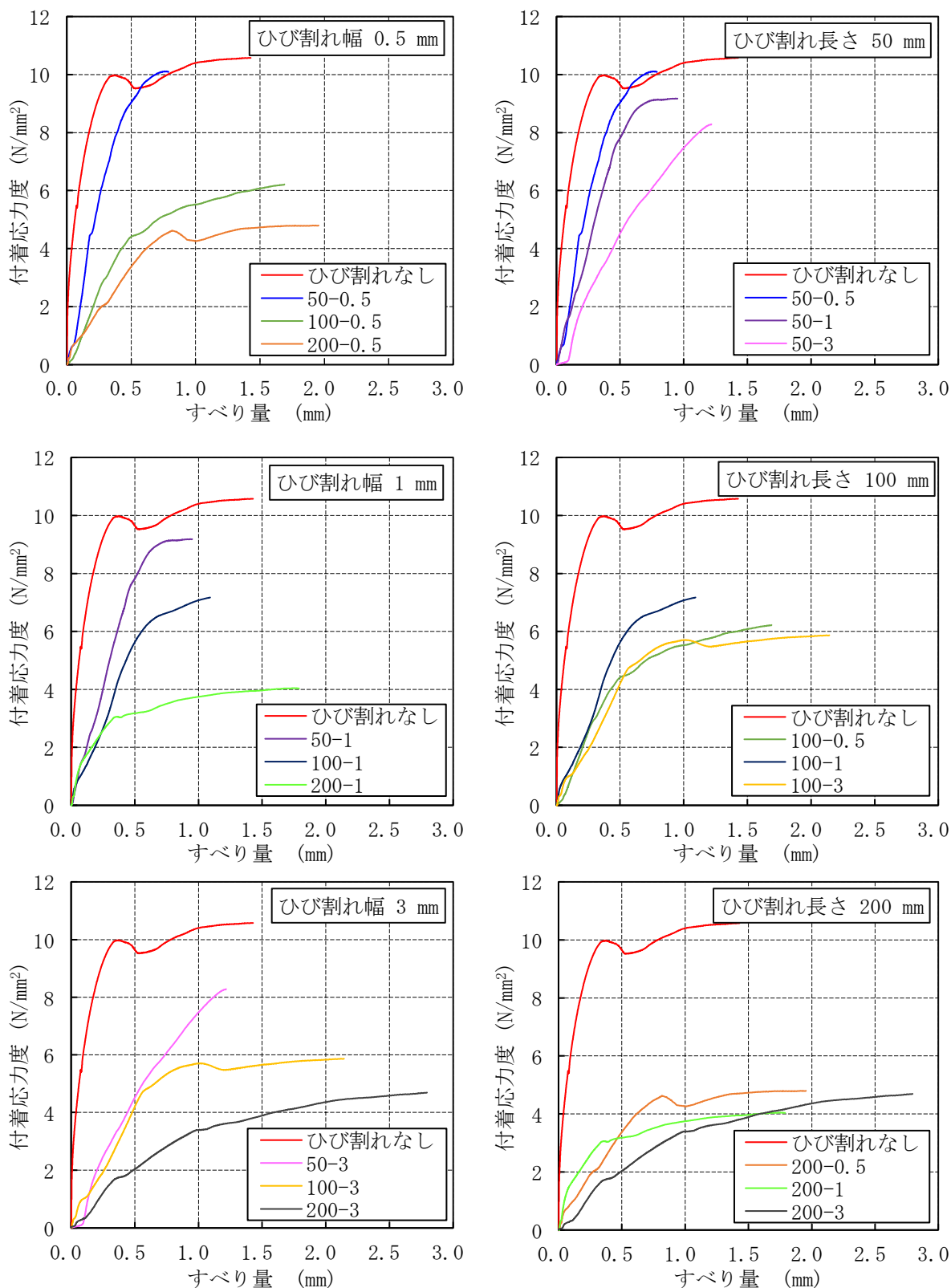
図 3.3.2-9 腐食グレードによるひび割れ幅と付着強度（一体性）の関係

2) FEM 解析を踏まえひび割れを模擬した RC 試験体による付着強度（一体性）低下とサブテラヘルツ波イメージングの関係

図 3.3.2-10 に、模擬ひび割れによる引き抜き時の力学特性（一体性）の結果を示す。ここでの一体性は、付着強度と考えることができる。引き抜き時の力学特性（一体性）の低下は、(a) ひび割れ長さによる整理、(b) ひび割れ幅による整理より検討を行った。ひび割れ長さが長くなるほど付着強度（一体性）が低下する傾向を示し、付着強度とすべり量の傾きが小さくなるほど、すべり量が増加することを確認した。また、ひび割れ長さ 200 mm に達するとひび割れ幅なしの試験体に比べて 60 %程度低下することを確認した。一方で、ひび割れ長さごとのひび割れ幅の影響は、ひび割れ幅によって付着強度は低下するが、ひび割れ長さによる付着強度（一体性）の低下と比較してひび割れ幅の影響度は小さいと判断できる。このため、付着強度（一体性）による RC 部材の構造性能を検証するためには、ひび割れ長さ、すなわちひび割れ発生領域の把握が重要であると推測される。

図 3.3.2-11 に RC 試験体の反射率分布を示す。付着強度試験後の試験体に対し、サブテラヘルツ波測定系による測定を 50 mm 間隔で行った。健全な、ひび割れなしの試験体は、コンクリート内部にひび割れがないため、電磁波はコンクリートでは反射せず透過し、鉄筋が電磁波を反射したことによって、健全部の平均反射率が 81 %と高い値が得られた。また、模擬ひび割れを有する試験体では、模擬ひび割れ部の平均反射率はひび割れ幅 0.5 mm で反射率 17~39 %を示し、ひび割れ幅 1 mm の平均反射率は 25~56 %と変動した結果が得られた。ひび割れ幅 3 mm の平均反射率は 53~59 %となり、図 3.3.2-8 の反射率とひび割れ幅の関係に示す結果と大きく変わらないことが認められた。

付着強度試験後の試験体のため、模擬ひび割れ部からさらにひび割れが進展する。ひび割れ導入位置を越えて反射率が相対的に高いことから、ひび割れの範囲は拡大しているものと想定される。この範囲は、目視観察によるひび割れ発生位置と概ね一致することが確認されている。以上の結果から、サブテラヘルツ波測定から得られる反射率を用いることによって、引抜き時の力学特性（一体性）の低下した領域をサブテラヘルツ波測定系の反射波から間接的に特定できるものと推測される。



(a) ひび割れ長さによる比較

(b) ひび割れ幅による比較

図 3.3.2-10 模擬ひび割れによる付着強度（一体性）の整理



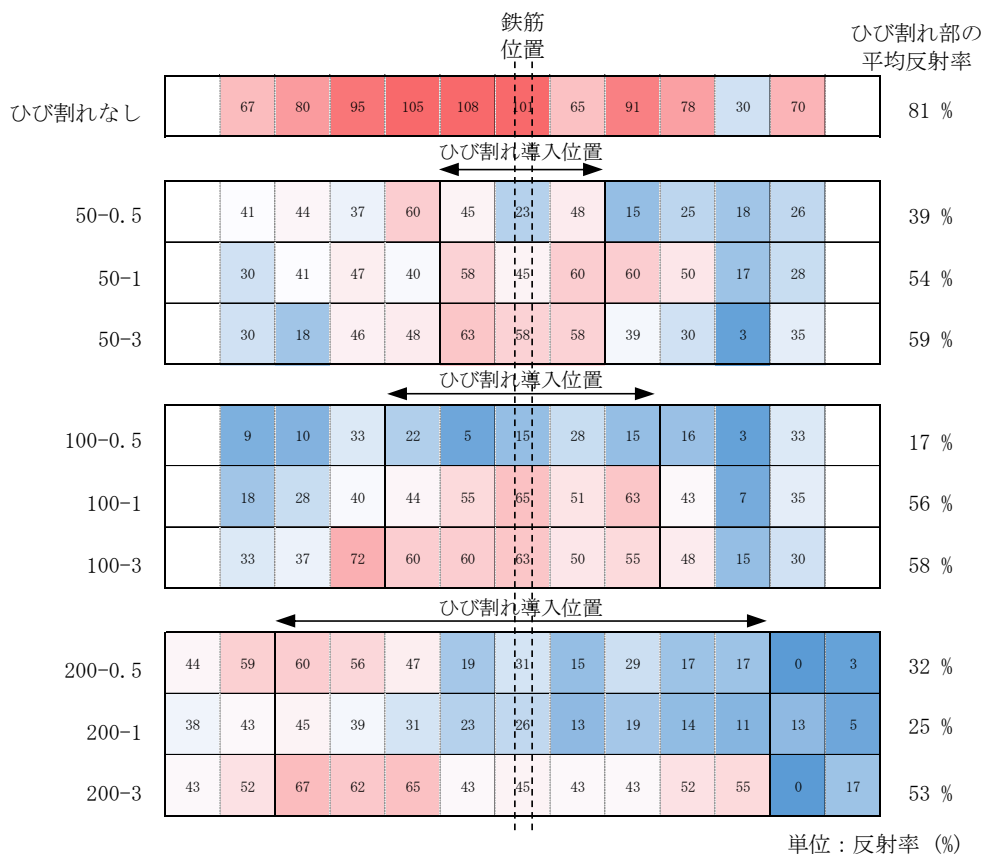


図 3.3.2-11 RC 試験体の反射率分布

②サブテラヘルツ波イメージングによる含水率（量）の評価検討

1) サブテラヘルツ波イメージングと含水状態の比較

含水率は、質量基準の質量含水率と容積基準の容積含水率の 2 つの指標に分類することができる。そこで本研究では、質量含水率と容積含水率の 2 つに分類して比較を行った。

コンクリートを対象としたサブテラヘルツ波の周波数と含水率（状態）の関係は、周波数によって異なり、特異的な関係を示す周波数があるとされる。質量含水率の推定を行うためには、適切な周波数を選定しなければならない。そこで、□100×t100 mm の試験体より含水状態が示す周波数と反射率の関係から、含水率の変化とともに反射率も一定の割合で増減する周波数を選定した。

図 3.3.2-12 に、選定した周波数における質量含水率と反射率の関係を示す。選定した周波数は 9.4、10.9、11.5、12.3 Ghz とした。材齢が経過してチャンバー内湿度環境と平衡となった試験体の結果では、高い寄与率が確認され、質量含水率の上昇とともに反射率が増加する傾向が確認された。

電磁波は一般的に水に吸収されるため、水量とともに反射率は減少を示すものと考えられるが、本実験は異なる結果となった。コンクリートが試験体間の差異はなく均質体として検討した結果、質量含水率が低い試験体では電磁波を反射する要素がなく、透過するため、低い反射率が得られると推測される。一方、質量含水率増加に伴う反射率の増加は、コンクリート細孔組織中の液滴が関与しているものと推測される。吸水された水は細孔組織中に非常に薄い水膜を作ることが推測され、質量含水率の増加

とともに水膜厚さが増えるものと考えられる。この水膜が反射率に及ぼす影響は、水膜厚さ 1 mm 以上では反射率 0.77 とほぼ一定になり、水膜厚さ 0.1 mm の反射率は 0.62 程度になると示唆されている<sup>[3.3.2-4]</sup>。このことから、コンクリート中の水膜厚さ、すなわち質量含水率の増加とともに反射率が増加したと推測される。

吸水によるコンクリート中の水膜状況の影響によって、サブテラヘルツ波計測系を用いた含水率（状態）の評価に限界状態が存在するものと予想されるが、図 3.3.2-12 に示されるように、質量含水率と反射率に一定関係性が示されることから、鉄筋腐食に影響を及ぼす含水率（状態）の評価は可能と推測される。

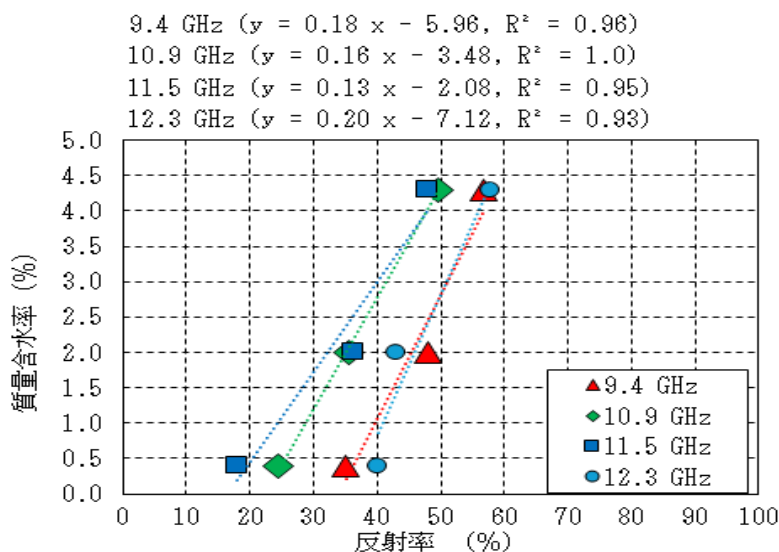


図 3.3.2-12 選定した周波数における質量含水率と反射率の関係

2) 容積含水率による評価コンクリート中の含水率は、試験体の大きさ・密度によって体積あたりの水分量が異なるため、サブテラヘルツ波に及ぼす含水率の影響は異なる。そこで、測定対象の厚み方向の影響を検討するため、かぶり厚さを想定した□200×t30 mm と□200×t50 mm の試験体を用いて検討した。コンクリート中の水分量の評価を、容積あたりの容積含水率とし、吸水時の試験体質量と絶乾時の試験体質量から水分量を試験体の容積で徐して求めた。

図 3.3.2-13 に周波数ごとの容積含水率と反射率の関係を示す。その結果、9.4 GHz は、含水率による反射率のばらつきが大きく、試験体厚さによる影響を無視できない結果を示した。また、10.9、11.5、12.3 GHz の周波数では、容積含水率が増えるとともに反射率も高くなる傾向が認められた。高周波数になるほど、強い関係性が得られることも確認した。

これらの関係から、周波数を選定することによって、厚さ方向による水分分布の影響を除外でき、反射率から測定対象表層の平均的な含水率を求めることができると推測される。さらに、反射率はコンクリート材料と水分の影響を合成した値として求められるが、正しく含水状態を把握するためには、コンクリート単体の反射率を把握することが重要である。そこで、より高精度に含水率を推定するためには、1 点のコア採取を行い、乾燥時の反射率から検量線を作成して検討することで、コンクリート構造物表層の含水率状態を判別できるものと推測される。

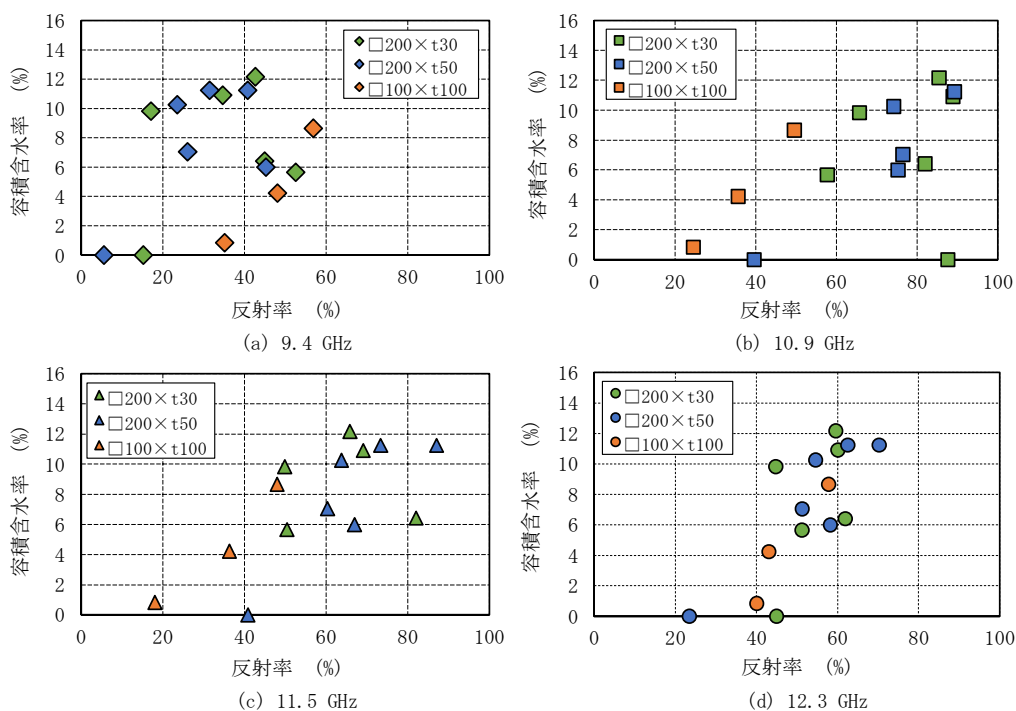


図 3.3.2-13 周波数ごとの容積含水率と反射率の関係

3) RC 壁試験体における反射率分布

図 3.3.2-14 に RC 壁試験体における反射率分布を示す。図中、青線枠は吸水範囲である。周波数によって反射率分布の傾向が異なることが認められた。

9.4、11.5、12.3 GHz の周波数で吸水範囲において、非吸水部に比べ高い反射率が得られており、吸水位置と概ね一致した。このため、一部の周波数においては、実構造物においても適用可能な性能を有しているものと推測される。

9.4、10.9 GHz では吸水範囲外の位置にて、意図しない高い反射が得られているが、図 3.3.2-12 に示されるように、同じ容積含水率でも反射率がばらつく傾向を示すため、意図しない分布が得られたと予想される。しかし、明確な原因は不明なため、光学系ならびに測定条件による影響などさらなる検討が必要である。

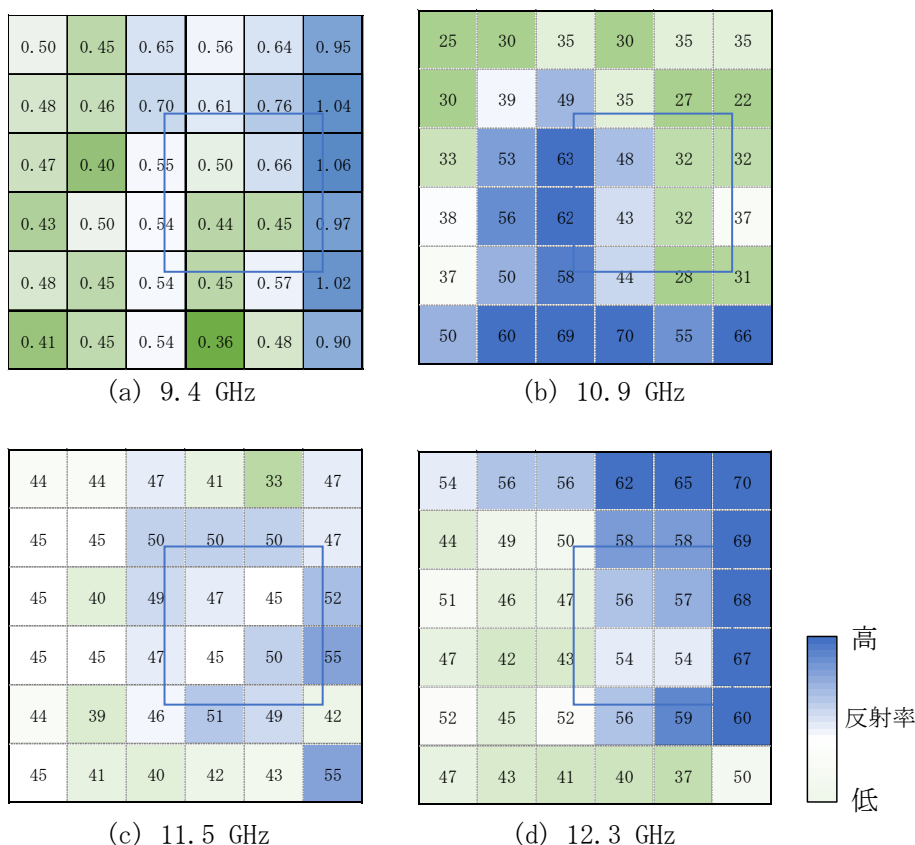


図 3.3.2-14 RC 壁試験体における反射率分布

4) サブテラヘルツ波イメージング技術による（質量）含水率の評価方法の提案

含水率の評価提案対象を鉄筋腐食に影響を及ぼすかぶりコンクリートとし、かぶりコンクリートの含水率の評価方法は、前述の 2)、3)を踏まえ、下記の通りに提案する。

本研究における範囲において、サブテラヘルツ波イメージング技術による含水率（質量含水率）の推定は、実験(2)の反射率と質量含水率の結果より、選定された周波数（10.9、11.5、12.3 GHz）を用いることで 0 ～ 4.5 %程度の範囲の評価が可能である。また、実験(3)の RC 壁試験体による反射率分布を踏まえ検討すると、選定された周波数のうち 11.5、12.3 GHz の反射率が最も吸水位置と一致し、非吸水部と明瞭な差を有する。以上の 2 点を踏まえ評価するとかぶりコンクリートの質量含水率は、11.5 GHz または 12.3 GHz を用いて評価することが、現時点において適当である。

したがって、かぶりコンクリートの質量含水率の推定は、図 3.3.2-12 に示される関係から導かれる式(3.3.2-1)、式(3.3.2-2)を用いて、反射率から含水率を求める方法を提案する。

質量含水率の推定式（適用範囲：0 ～ 4.5 %）

(11.5 GHz)  $\theta = 0.13 \times R - 2.08$  式(3.3.2-1)

(12.3 GHz)  $\theta = 0.20 \times R - 7.12$  式(3.3.2-2)

ここで、

$\theta$  : 質量含水率 (%)

R : 反射率 (-)

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4年度実施内容及び成果】

(1) RC造耐震壁静的実験の再現解析

① はじめに

ここでは、せん断破壊先行型のRC造耐震壁の既往の実験を参考にFEモデルを作成し、解析モデルの妥当性について検討した。解析には、汎用コードDiana10.5を用いて、3次元非線形FEM解析を行った。

② 解析対象試験体の概要

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造耐震壁である<sup>[3.3.3-1]</sup>。試験体諸元を表3.3.3-1、試験体形状及び配筋を図3.3.3-1にそれぞれ示す。試験体は両側柱付きの耐震壁で、耐震壁の中でも原子力施設などに見られる壁筋比の高いせん断破壊先行型RC造耐震壁を模擬し、1/4程度に縮小した形状になっている。詳細として、壁内法スパンが1400mm、柱中心間距離が1600mm、壁高さが1000mm、せん断スパン比が0.29である。壁板は、厚さ120mmで配筋をD6@40(SD295)Doubleとし、壁筋比1.32%となっている。なお、鉄筋の径は、壁の損傷状況には鉄筋径が影響する可能性があるといった既往の知見<sup>[3.3.3-2]</sup>を基に計画されている。また、柱及びスタブ断面は、スケール感を逸脱しない範囲で、かつ加力装置との接続の関係から、それぞれ200mm×200mm、400mm×400mmである。加力計画は図3.3.3-2に示すように、2本の水平ジャッキ(1000kN)を用いて静的繰り返し载荷により加力を行っている。2本の水平ジャッキは、試験体の反曲点が常時壁高さ(H=1000mm)の中央(H/2)になるよう設置されている。また、2本の鉛直ジャッキを用いて試験体の壁板と柱の全断面積に対して常時軸応力度0.5N/mm<sup>2</sup>程度の一定軸力(ジャッキ2本合計で125kN)がかかるようにしている。

表 3.3.3-1 解析対象試験体の諸元

壁	壁高さ(mm)	1000
	壁板内法高さ(mm)	1400
	壁厚(mm)	120
	縦筋・横筋	D6@40(SD295) Double
	縦・横筋比(%)	1.32
	コンクリート強度 $F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	27
	せん断スパン比	0.29
柱	断面 $b \times D$ (mm×mm)	200×200
	主筋	12-D16(SD345)
	帯筋	2-D10(SD345) @60

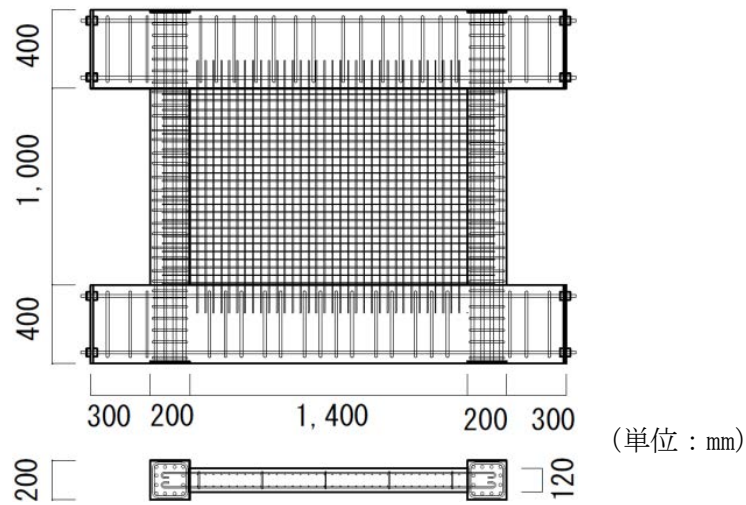


図 3. 3. 3-1 解析対象試験体の形状及び配筋

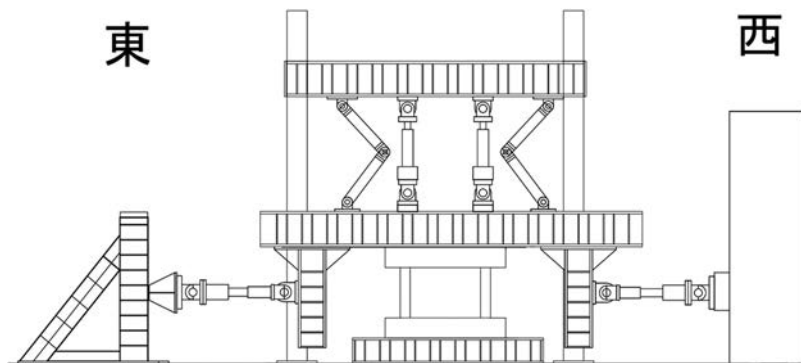
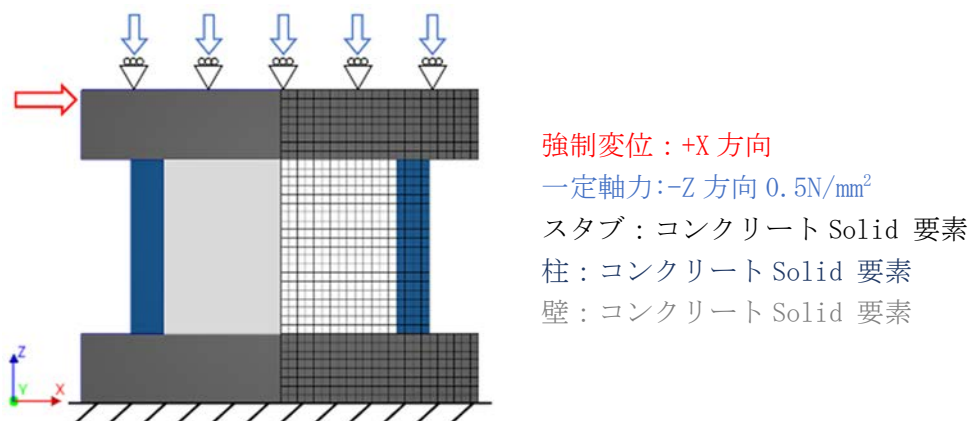


図 3. 3. 3-2 実験における加力状況

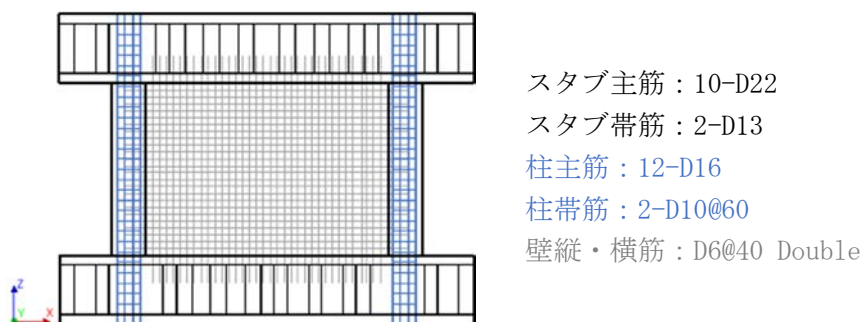
### ③ 解析モデル

本研究で用いた解析モデルの要素及び境界条件を図 3. 3. 3-3、図 3. 3. 3-4 に示す。コンクリートは六面体 Solid 要素、鉄筋は 2 節点 Beam 要素でそれぞれモデル化する。壁幅止め筋、PC 鋼棒のモデル化は省略している。境界条件は、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。荷重方法として、上スタブ頂部の全節点に-Z 方向に  $0.5 \text{ N/mm}^2$  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向荷重とした。なお、解析は単調荷重としている。また、荷重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、実験の加力条件と同様に、壁高さ方向の中央に反曲点が生じるようにしている。



強制変位：+X 方向  
 一定軸力：-Z 方向  $0.5\text{N/mm}^2$   
 スタブ：コンクリート Solid 要素  
 柱：コンクリート Solid 要素  
 壁：コンクリート Solid 要素

図 3.3.3-3 解析モデル (Solid 要素)・境界条件



スタブ主筋：10-D22  
 スタブ帯筋：2-D13  
 柱主筋：12-D16  
 柱帯筋：2-D10@60  
 壁縦・横筋：D6@40 Double

図 3.3.3-4 解析モデル (Beam 要素)

#### ④ 材料構成則

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。コンクリートの圧縮挙動は図 3.3.3-5(a)に示す Eurocode<sup>[3.3.3-3]</sup>を用い、横ひび割れによる圧縮強度の低減は Vecchio and Collins 1993 のモデル<sup>[3.3.3-4]</sup>により評価した。また、横拘束効果による圧縮強度の上昇を Selby and Vecchio のモデル<sup>[3.3.3-5]</sup>により評価した。引張挙動は図 3.3.3-5(b)に示す Hordijk モデル<sup>[3.3.3-6]</sup>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  $G_f$  は文献<sup>[3.3.3-7]</sup>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<sup>[3.3.3-1]</sup>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。壁、柱部分の鉄筋の材料特性は材料試験結果<sup>[3.3.3-1]</sup>に基づき表 3.3.3-3 に示す値を用いた。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する。スタブ主筋、スタブ帯筋は実験で未降伏のため、線形弾性等方性モデルを用いた。スタブ部分の鉄筋のヤング係数  $E_s$  は表 3.3.3-3 に示す値とした。コンクリート-鉄筋間の付着は完全付着としている。

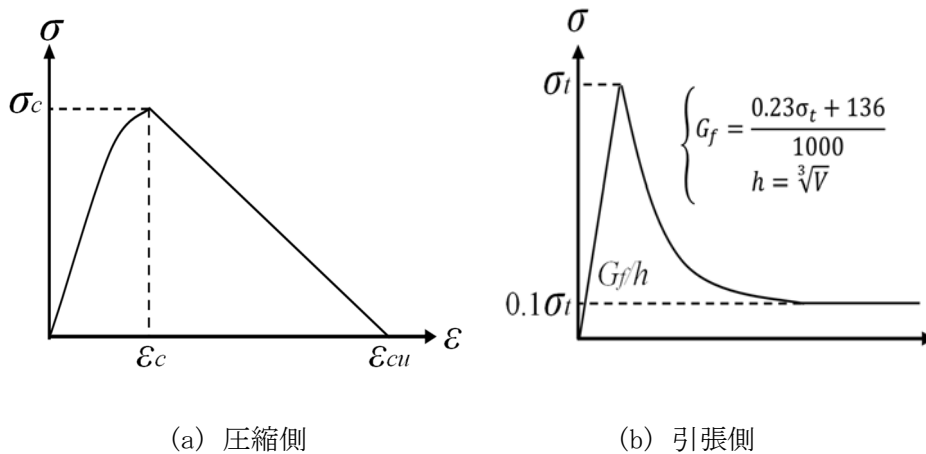


図 3.3.3-5 コンクリートの材料構成則

表 3.3.3-2 コンクリートの材料特性

		値
材齢(日)		61
密度 (t/mm <sup>3</sup> )	$\rho$	$2.40 \times 10^{-9}$
ポアソン比 (-)	$\nu$	0.2
ヤング係数 ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )	$E$	3.28
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$	40.2
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t$	3.46
引張破壊エネルギー (N/mm)	$G_f$	$G_f = \frac{0.23f_t + 136}{1000}$

表 3.3.3-3 鉄筋の材料特性

	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
	$\sigma_y$	$E_s$
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



⑤ 解析結果

本項では、実験結果と解析結果の比較を通じて、上記で設定した FE モデルの妥当性を検証する。

図 3.3.3-6 に解析結果と実験結果の層せん断力－層間変形角関係の比較を示す。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。実験結果<sup>[3.3.3-1]</sup>は正負交番繰り返し静的漸増载荷のため、正載荷側における各サイクルの包絡線として示している。解析結果は実験結果と同じく層間変形角が約 0.05 %時にひび割れが発生している。ひび割れ発生時層せん断力は解析が過大評価しているが、実験試験体における乾燥収縮などの微細なひび割れが影響したためと考えられる。ひび割れ後の剛性はほぼ一致しており良い対応が見られた。各鉄筋の降伏については、柱主筋、壁横筋の降伏のタイミングに多少のずれがあるものの概ねその傾向は捉えている。最大耐力については、解析では層間変形角が約 0.69 %時に 1,960 kN に達した。実験結果の最大耐力 2,013 kN と比較すると 3 %程度の誤差であった。

最大耐力時の解析結果の最大主ひずみ図と実験結果のひび割れ図をそれぞれ図 3.3.3-7、図 3.3.3-8 に示す。実験結果の破壊モードは、最大耐力後に壁面のコンクリートが圧壊するせん断破壊により終局に至っている。解析結果の最大主ひずみは、既往実験のひび割れ領域と同様に柱頂部から他端柱脚部に向かって分布しているため、解析結果は実験の破壊モードを十分に再現できていると考えられる。

以上より、本解析モデルはせん断破壊型の RC 造耐震壁の耐力、剛性、破壊モードを概ね再現できることを確認した。

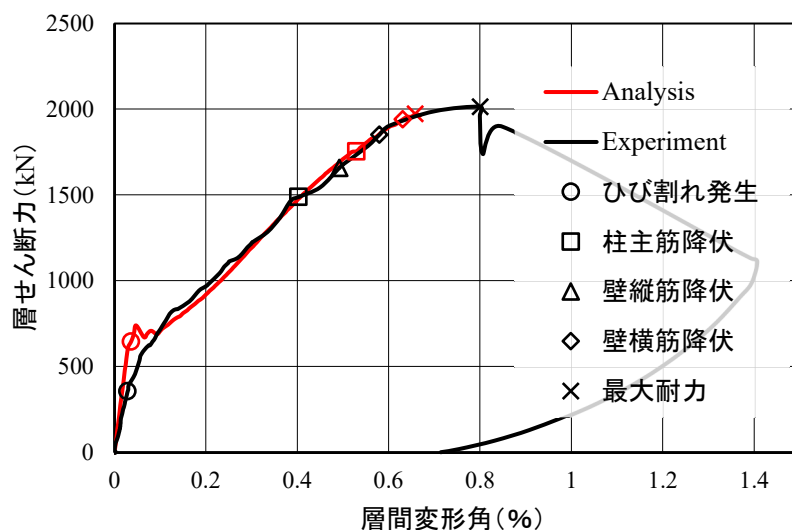


図 3.3.3-6 層せん断力－層間変形角関係

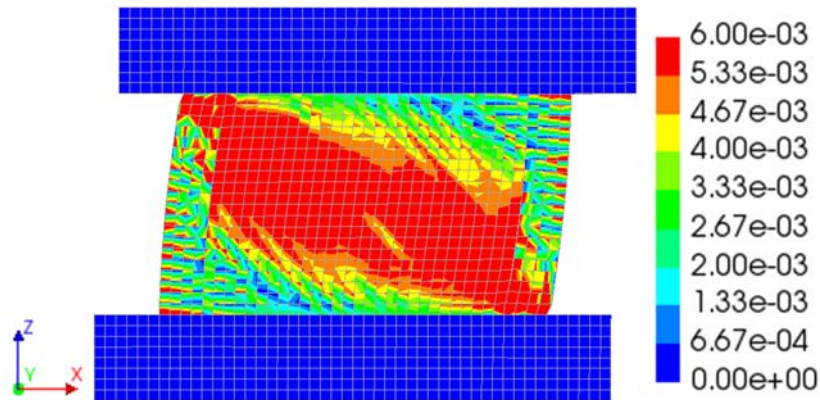


図 3.3.3-7 最大耐力時の最大主ひずみ分布

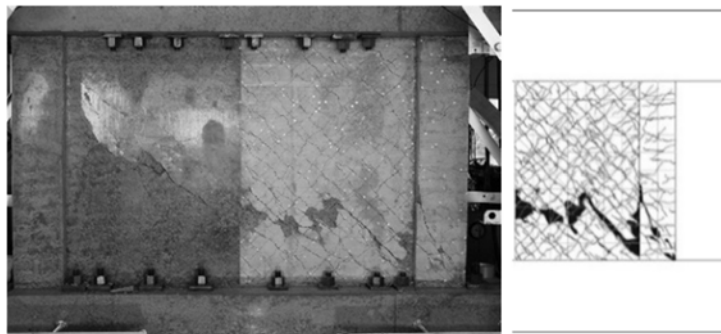


図 3.3.3-8 実験の最終破壊状況

(2) 任意の損傷を有する RC 造耐震壁の性能評価

① はじめに

本研究で対象とする、1F 建屋の耐震壁の損傷状況は現状不明確な点が多い。ここでは、前項の FE モデルをベースに、任意の損傷を有する RC 造耐震壁について、その損傷程度と箇所を変数としたパラメトリックスタディを通し、それぞれの劣化程度を試算した。本項で設定する任意損傷は、部材性能劣化が確実に現れ、かつ単純な損傷状態とした。また、損傷部位は、壁要素のコンクリートのみとし、その時、壁厚さ方向は同一レベルの損傷を有するものと仮定した。

② 任意損傷の設定

1) 損傷程度

表 3.3.3-4 に、仮定したコンクリートの損傷程度と力学特性の関係を示す。損傷程度を軽微・小・中・大の 4 段階に仮定し、それぞれ圧縮・引張強度及びヤング係数を低下させた。損傷後の強度はそれぞれ無損傷の値に対し、損傷程度が軽微の時は 0.8、小の時は 0.6、中の時は 0.4、大の時は 0.2 倍とした。ヤング係数  $E$  は低減した圧縮強度を用いて RC 規準<sup>[3.3.3-8]</sup>の推奨式で仮定した。

2) 損傷箇所

図 3.3.3-9 に本項で仮定したコンクリートの損傷箇所を示す。損傷箇所は、壁要素の全面、及び上下左右の半面がそれぞれ損傷する場合に加え、無損傷時の主要な応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計 7 パターンに仮定した。

表 3.3.3-4 仮定したコンクリートの損傷程度と力学特性の関係

		材料レベルの損傷程度				
		無損傷	軽微	小	中	大
材料物性値	圧縮強度	$f_c$	$f'_c = f_c \times 0.8$	$f'_c = f_c \times 0.6$	$f'_c = f_c \times 0.4$	$f'_c = f_c \times 0.2$
	引張強度	$f_t$	$f'_t = f_t \times 0.8$	$f'_t = f_t \times 0.6$	$f'_t = f_t \times 0.4$	$f'_t = f_t \times 0.2$
	ヤング係数	$E$	$3.35 \times 10^4 \times (23/24)^2 \times (f'_c/60)^{\frac{1}{3}}$			

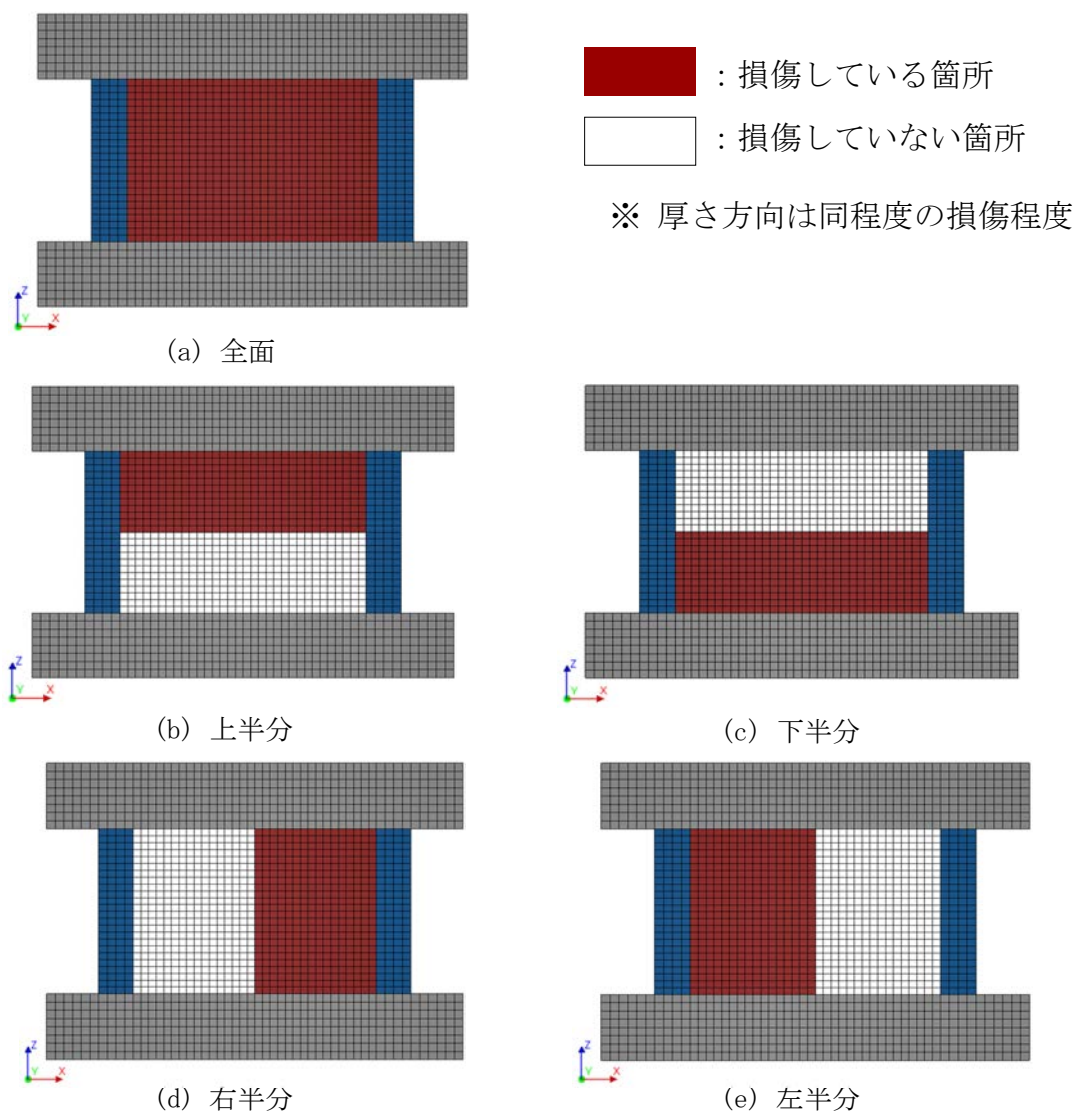


図 3.3.3-9 仮定した壁面コンクリートの損傷箇所 (1/2)

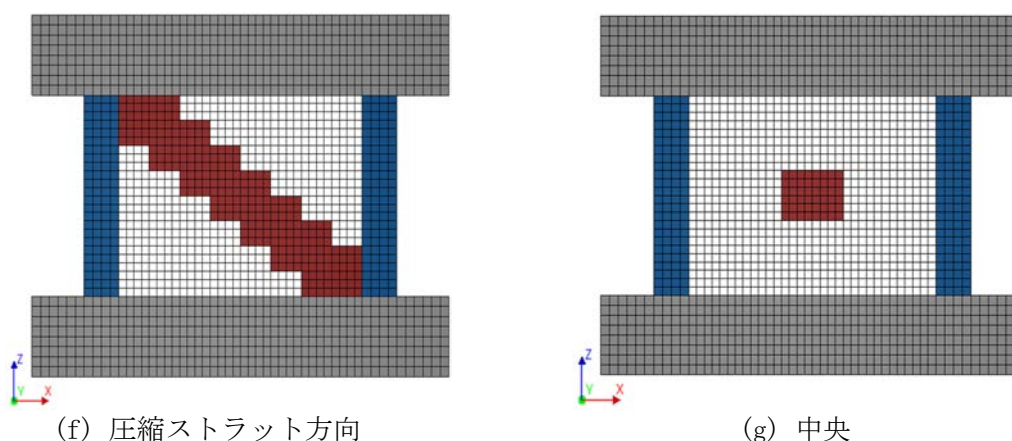


図 3.3.3-9 仮定した壁面コンクリートの損傷箇所 (2/2)

### ③ 解析結果

本項では、前項までに仮定した損傷箇所 7 パターンそれぞれに対し損傷程度 4 パターンを適用した 28 モデルに、無損傷モデルを加えた計 29 モデルの解析結果について比較検討する。

図 3.3.3-10 に、各モデルの層せん断力-層間変形角関係を、図 3.3.3-11 に、無損傷モデルに対する有損傷モデルの各構造性能の比である最大耐力比、変形性能比、初期剛性比と損傷程度との関係をそれぞれ示す。すべての有損傷モデルは無損傷モデルと比較して最大耐力比及び初期剛性比が低下した。また、壁面右（左）半分に損傷を有するモデルの変形性能比は他の有損傷モデルとは異なり、損傷程度が中、大になると 1 を上回る値となった。

図 3.3.3-12 に損傷程度が小の時の最大耐力時最大主ひずみ分布を示す。全面、右半分、圧縮ストラット方向、中央にそれぞれ損傷を有するモデルは損傷箇所がそれぞれ異なるものの、最大主ひずみが無損傷モデルと同様に分布し、破壊モードも同様である。そのため、損傷箇所の面積が大きいほど最大耐力比、初期剛性比が低下したと考えられる。また、上半分に損傷を有するモデルはその他の有損傷モデルとは異なり、損傷を有する箇所に最大主ひずみが集中して分布し、破壊モードが他と異なった。そのため、同損傷面積である右半分損傷モデルに比べ最大耐力比、初期剛性比が低い値を示したと考えられる。

図 3.3.3-10(d) に示した右半分損傷・損傷程度中のモデルにおいて、最大耐力と同等となる層せん断力が  $R = 0.37$  %程度で現れたことなどが影響し、変形性能比が無損傷モデルを上回る結果に至った。この理由の考察のため、図 3.3.3-13 に対象モデルの層間変形角が  $R = 0.37$  %時及び最大耐力時の最大主ひずみ分布を示す。まず  $R = 0.37$  %時に損傷箇所の壁面右半分に最大主ひずみが生じ、最大耐力同程度の層せん断力まで達した。その後最大耐力に達するまで損傷していない壁面左半分のみでせん断耐力を負担したため段階的に破壊が生じ、変形性能比が無損傷モデルを上回る結果に至ったと考えられる。

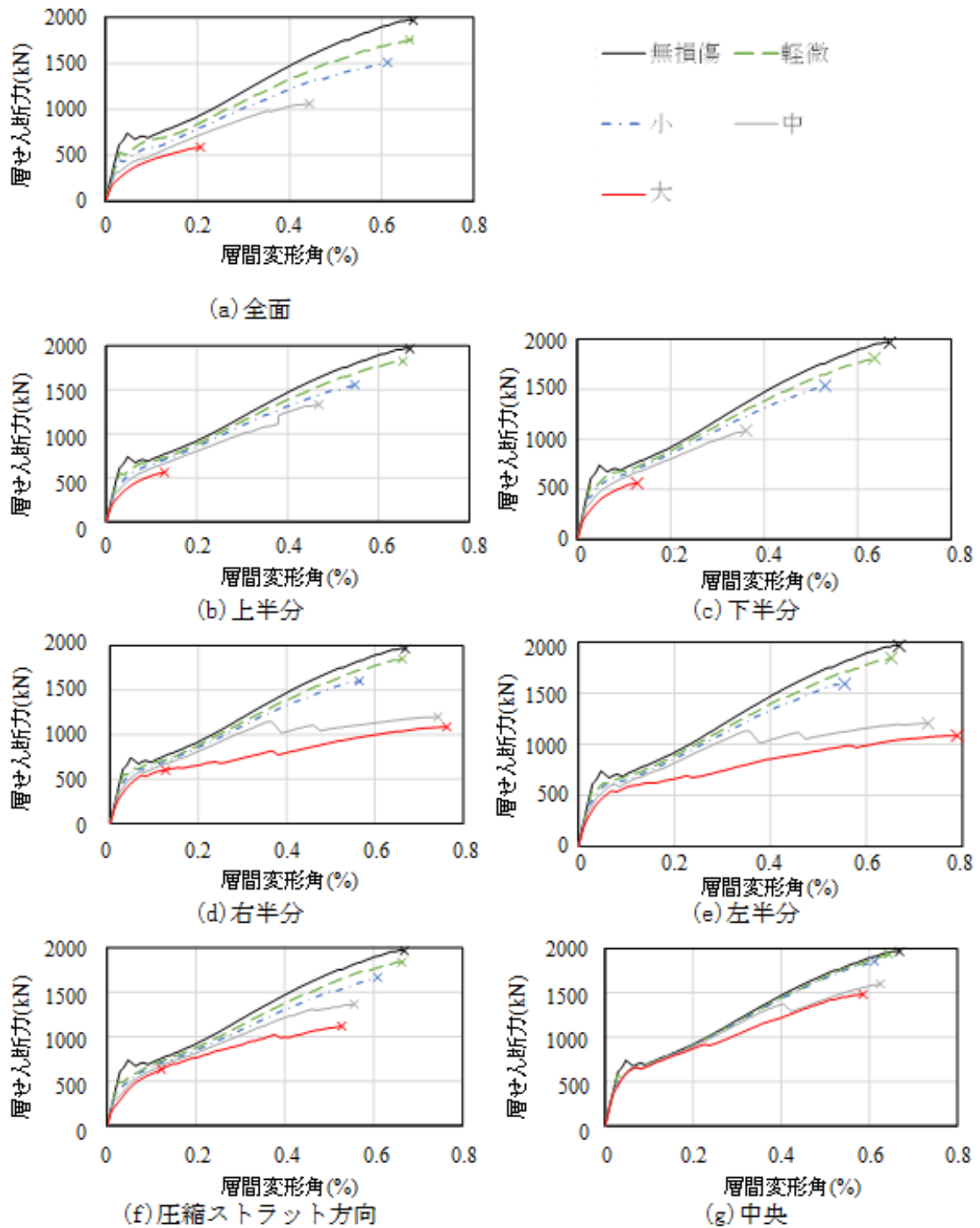


図 3.3.3-10 各損傷を有するモデルの層せん断力-層間変形角関係

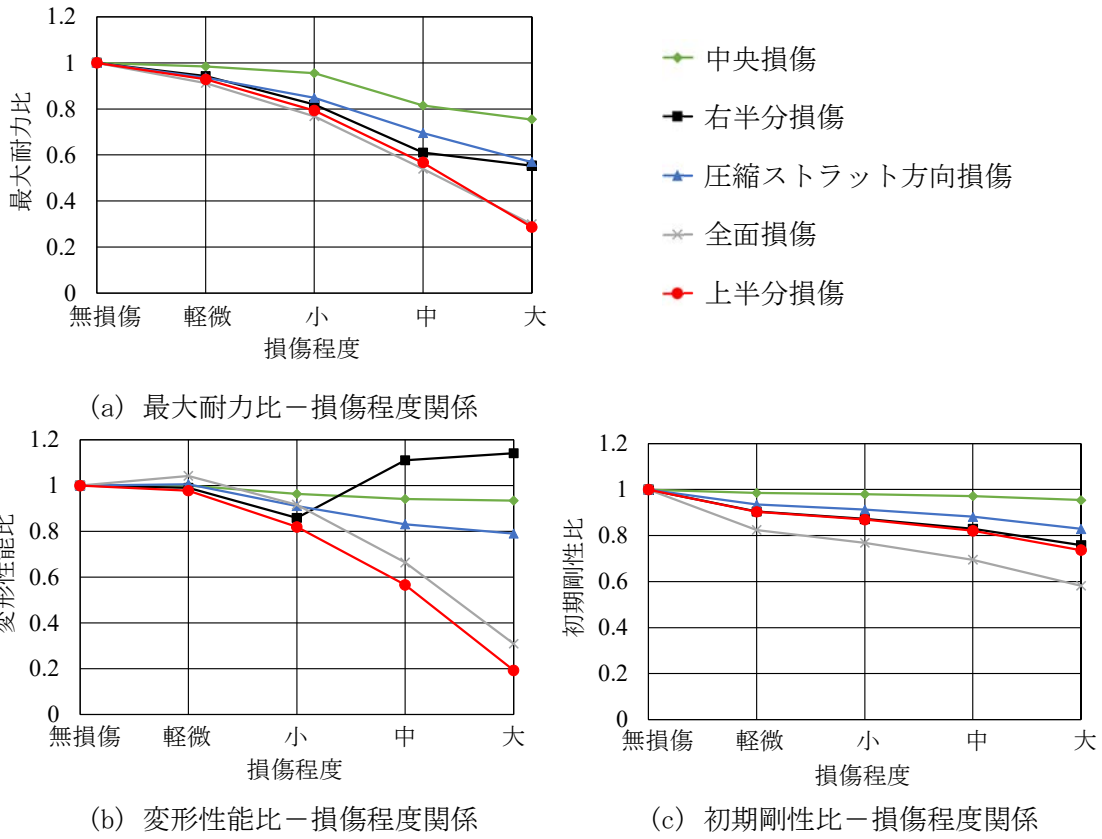


図 3. 3. 3-11 無損傷モデルに対する有損傷モデルの各構造的な性能比

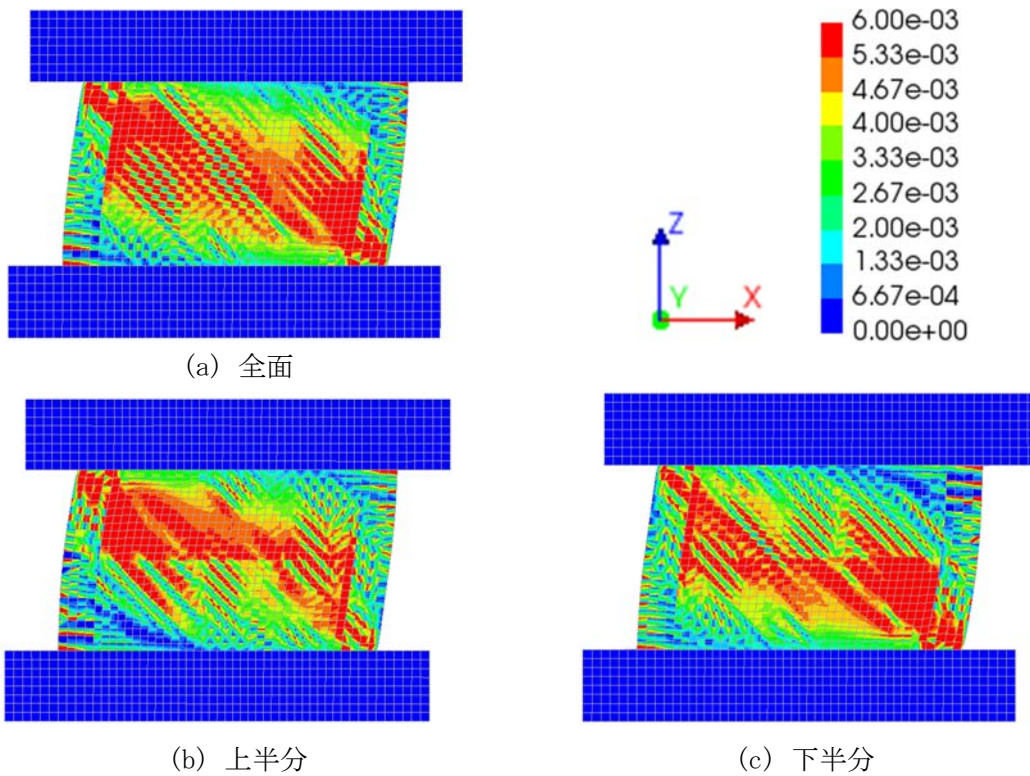


図 3. 3. 3-12 損傷程度が小である各モデルの最大耐力時の最大主ひずみ分布 (1/2)

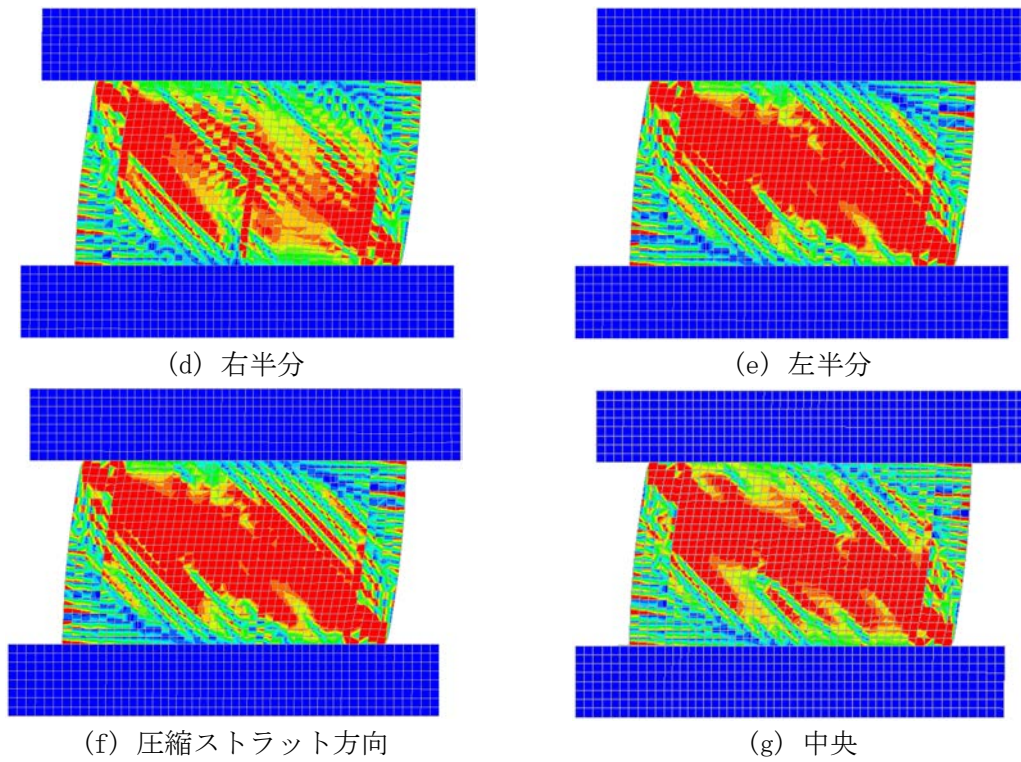


図 3. 3. 3-12 損傷程度が小である各モデルの最大耐力時の最大主ひずみ分布 (2/2)

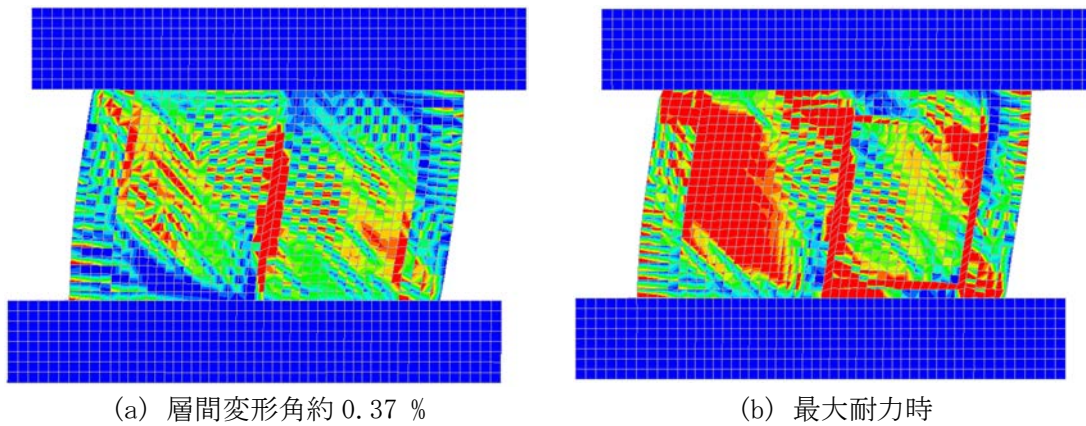


図 3. 3. 3-13 右半分の損傷程度が中である有損傷モデルの最大主ひずみ分布

④ 性能評価マトリクスの作成

本項では、無損傷モデルに対する有損傷モデルの残存性能を整理する。具体的には、図 3.3.3-14 に示すように、無損傷及び有損傷モデルそれぞれの荷重変形関係から得られるエネルギーの比を算出し、これらの値を暫定的に解釈するため、被災度区分判定基準<sup>[3.3.3-9]</sup>で定義される耐震性能低減係数  $\eta$  (表 3.3.3-5) の境界値を参考に損傷度を区分する。表 3.3.3-6 にその結果を示す。損傷箇所の面積に従ってエネルギー比が小さくなる傾向であるが、前述の通り破壊モードによる影響も見られる。壁面の左または右半分の有損傷モデルはコンクリートの損傷程度が中、大になると変形性能が無損傷モデルよりも高いことが影響し、エネルギー比も高くなった。壁面の上または下半分の有損傷モデルは損傷個所の損傷程度が大きくなると、損傷部に破壊が集中しやすいことが影響し、エネルギー比が小さくなる結果に至った。

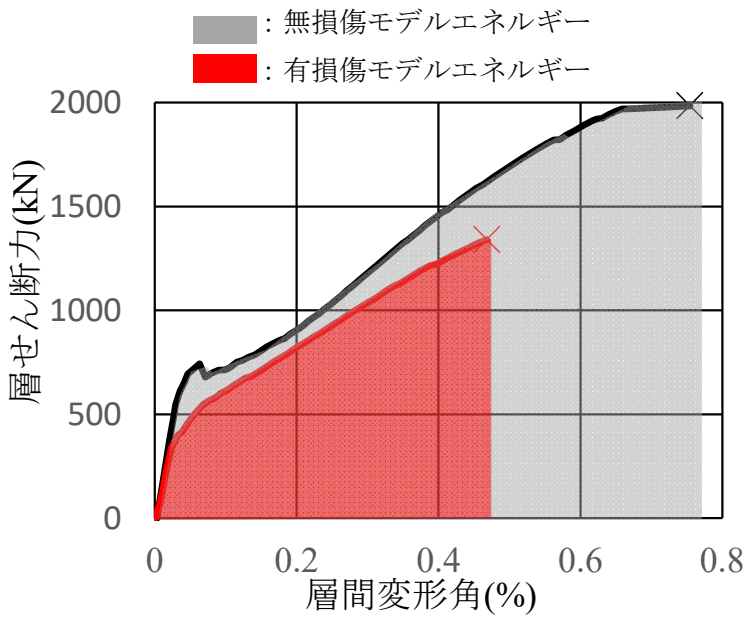


表 3.3.3-5  
耐震性能低減係数  $\eta$  の値  
[3.3.3-9]

耐震性能 低減係数 $\eta$	
RC 造壁	
損傷度	せん断
I	0.95
II	0.6
III	0.3
IV	0

図 3.3.3-14 各モデルのエネルギー概念図

表 3.3.3-6 性能評価マトリクス

	材料レベルの損傷程度			
	軽微	小	中	大
中央損傷	0.95	0.91	0.83	0.72
右半分損傷	0.93	0.71	0.82	0.71
左半分損傷	0.91	0.70	0.81	0.75
圧縮ストラット損傷	0.94	0.76	0.61	0.50
全面損傷	0.96	0.73	0.39	0.11
上半分損傷	0.93	0.67	0.35	0.06
下半分損傷	0.90	0.65	0.37	0.06
	損傷度I	損傷度II	損傷度III	損傷度IV



## ※ 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

- ・ 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た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。

## (2) 鉄筋腐食と付着不良・剥離などに基づく材料特性の評価

- ・ 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、質量含水率また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。

## (3) 材料劣化特性に基づく部材の耐震性能評価

- ・ せん断破壊先行型 RC 造耐震壁の実験を対象とした FE モデルを作成し、実験における耐力・剛性・破壊モードを精度良く再現することができた。
- ・ 壁要素に任意の損傷を有するモデルと無損傷モデルを比較して、コンクリートの損傷箇所・程度が耐震壁の構造特性に及ぼす影響を定量的に評価した。また、有損傷モデルの破壊モードの分析を通し、各モデルの構造特性劣化との関係性を評価した。
- ・ 本解析で検討した有損傷モデルについて、任意に設定したコンクリートの損傷情報から耐震壁の残存性能を簡易に判別可能な性能評価マトリクスを示した。

### 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4年度）

#### 【令和3年度までの実施内容及び成果（概要）】

##### (1) 総合的な建屋安全性評価手法の開発

研究課題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（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（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。

研究課題①～③の会議及び全体会議を随時開催し、また、東北電力女川原子力発電所の見学会などを行い、原子力建屋の構造特性を踏まえて、構造性能健全性を効果的に評価するためのコンクリート構造の損傷の特性や、必要な調査に関する共通認識を得た。

また、高放射線量率/高汚染等のため接近が困難な原子炉建屋に対する長期保全計画（保全対象部位、保全方法、保全時期の3者から成る計画）を立案するための考え方を検討し、戦略的で効率的・効果的な方法を考案・導入することの重要性を指摘した。

##### (2) 長期保全計画の提案

令和3年度までの長期保全計画に関する成果の概要を以下に述べる。

- ・ 研究課題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（研究課題①）に対して、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、最終成果の目標を設定した。
- ・ 電磁波イメージング研究（研究課題②及び③）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、最終成果の目標を設定した。
- ・ 原子炉建屋等への接近性が困難等の事故炉廃止措置の特徴を踏まえ、原子炉建屋の長期健全性を確認するための保全計画の在り方、考え方等を検討するとともに、研究課題①～③の検討状況を踏まえて長期保全計画のイメージについて検討した。

#### 【令和4年度実施内容及び成果】

##### (1) 総合的な建屋安全性評価手法の開発

- ・ 研究課題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、引き続き、検討すべき項目を抽出し、課題を整理した。
- ・ 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た。

令和4年度の検討結果を踏まえ、最終年度（令和5年度）に検討すべき課題を、以下の通り整理した。

- 1) 課題①で開発した性能曲線の補正、応答推定及び構造健全性判定手法を、1F 建屋の構造解析モデルと、東京電力が実施した応答観測記録に適用して、有効性を検討すること。
- 2) 課題②で開発しているテラヘルツ・サブテラヘルツ波による損傷検知技術の適用範囲（計測可能距離・範囲）と精度（検出可能なひび割れや鉄筋腐食の長さ、面積など）を明確にすること。
- 3) 課題③から提供される、損傷したコンクリートの応力度～ひずみ度関係、鉄筋の応力度～ひずみ度関係・付着応力～すべり関係、部材の構造性能と損傷イメージや損傷レベルとの関係を明確にすること。

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（図 3.4-1）、ii) 等価 1 自由度系への縮約（図 3.4-2）、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（図 3.4-3）、iv) 被災度区分の設定（図 3.4-4）と観測値による被災度（構造健全性）の判定（図 3.4-5）、v) 将来の地震による応答推定と構造健全性予測（図 3.4-6）とした。

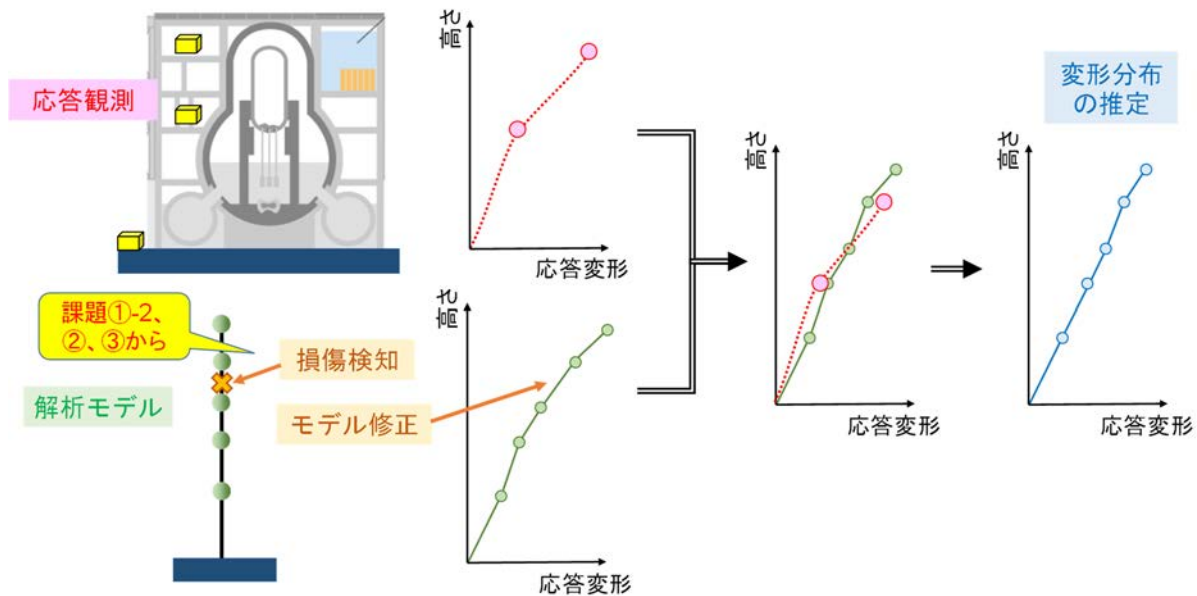


図 3.4-1 加速度応答観測値に基づく各層の加速度・変形の推定

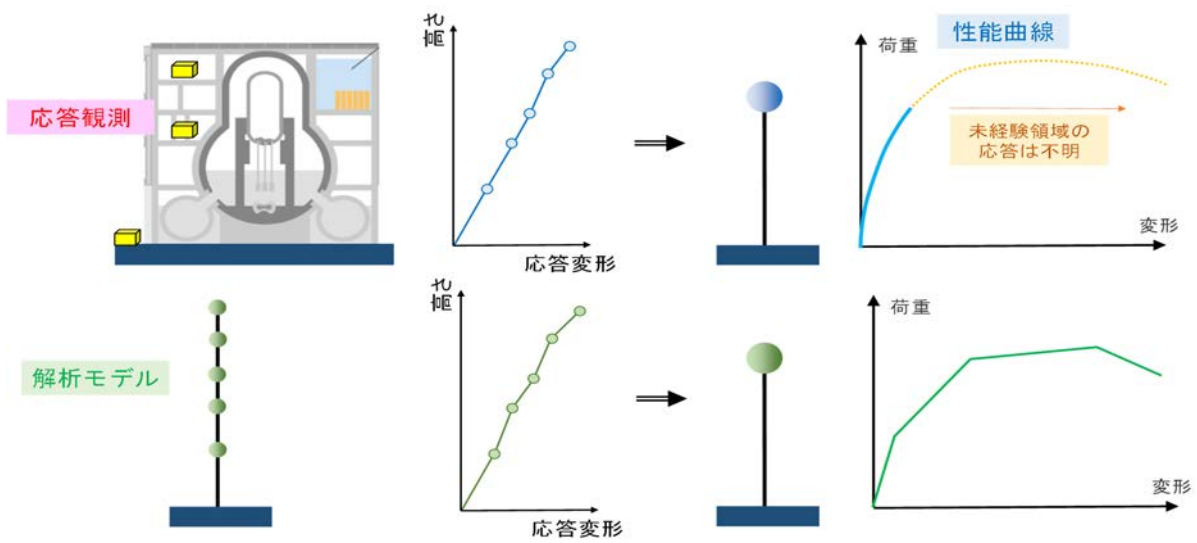


図 3.4-2 等価 1 自由度系への縮約

- ◆ 解析モデルを補正 (Fitting)
  - ✓ 解析モデルの係数倍法
  - ✓ Kalman Filter法 など検討中

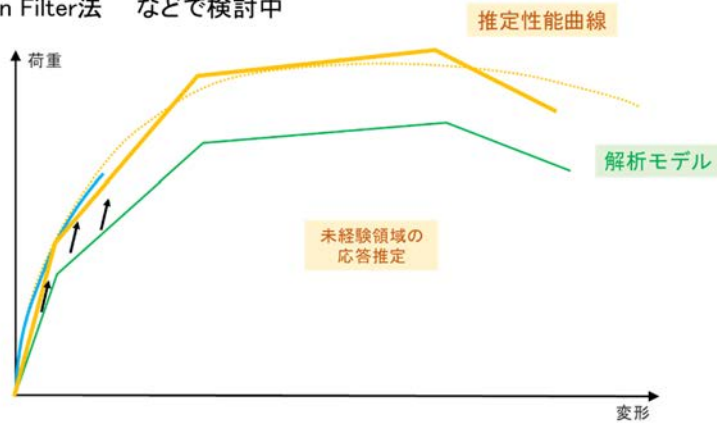


図 3.4-3 応答観測値や損傷イメージを用いた解析モデルの性能曲線の補正

- ◆ 応答変形と被災度の関係
  - ✓ 損傷検知 (課題②、③)
  - ✓ 建築防災協会「被災度区分判定基準」などを参考に

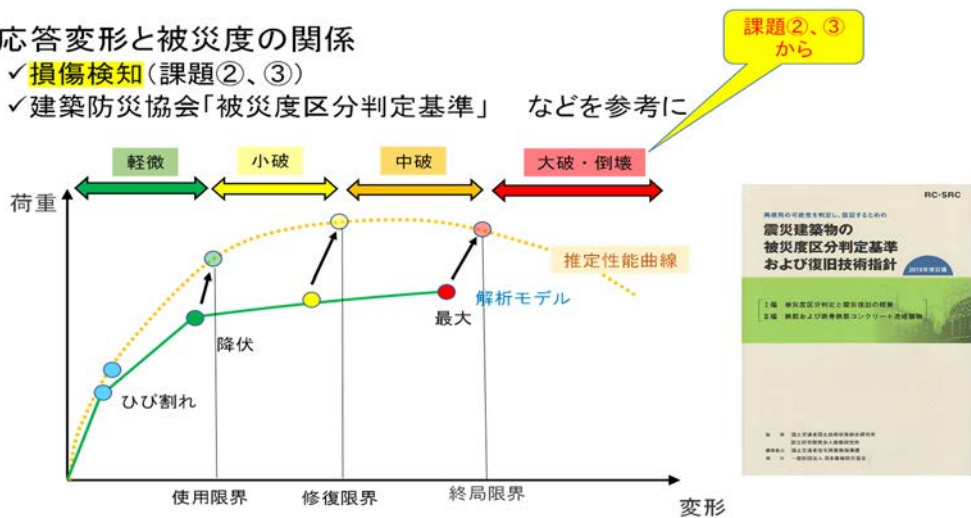


図 3.4-4 被災度区分の設定

◆観測した応答変形から被災度を判定

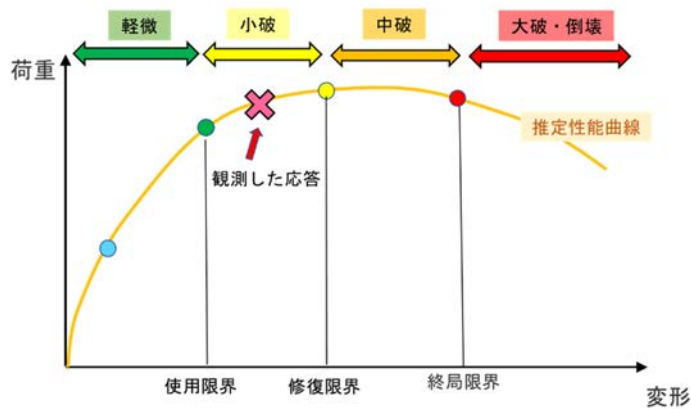


図 3.4-5 観測値による被災度（構造健全性）の判定

◆応答スペクトル法

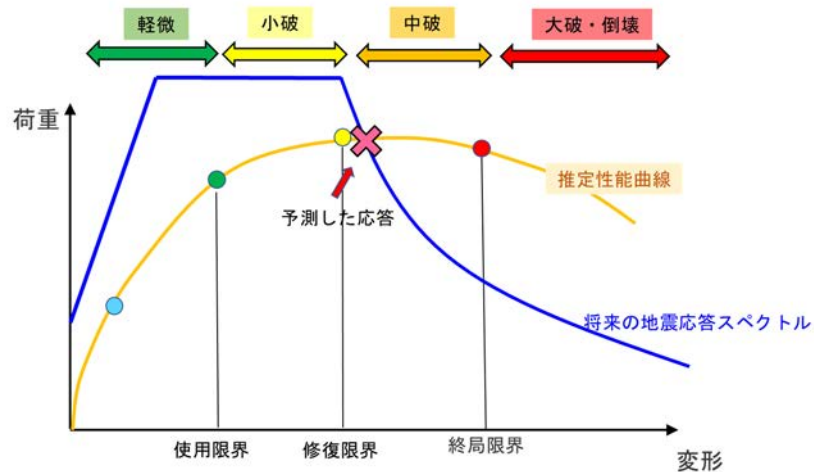


図 3.4-6 将来の地震による応答推定と構造健全性予測

(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 3.4-7）が取られることを想定して検討を進める。

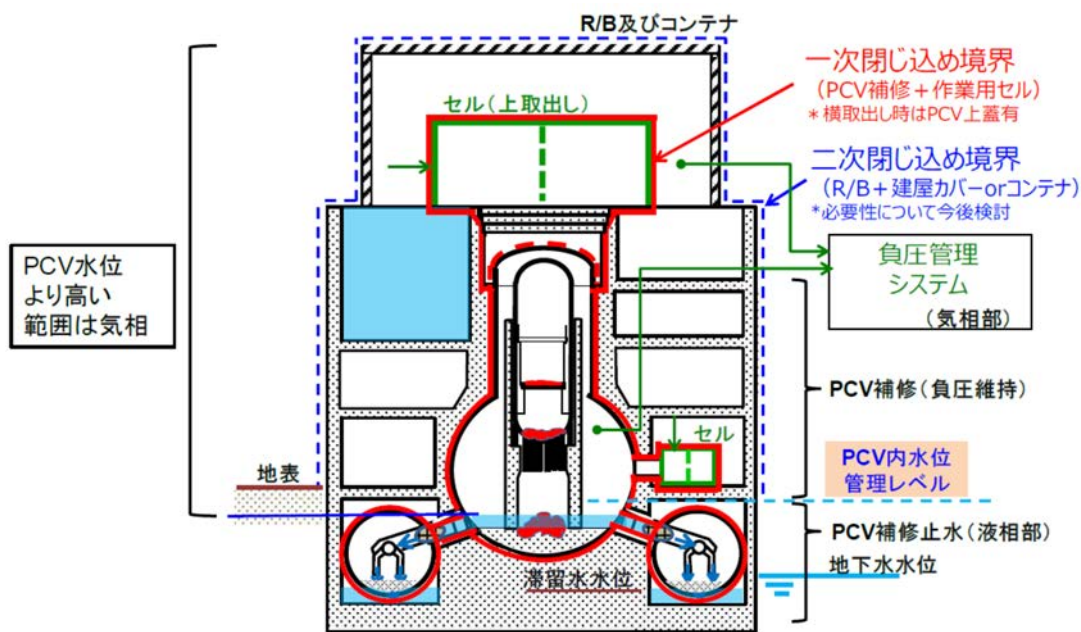


図 3.4-7 負圧管理による閉じ込め機能（気相部）の構築例<sup>[3.4-1]</sup>

昨年度（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。今年度（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開始した。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、この時点で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ことが重要と考え、検討した。検討結果を図 3.4-8 に示す。

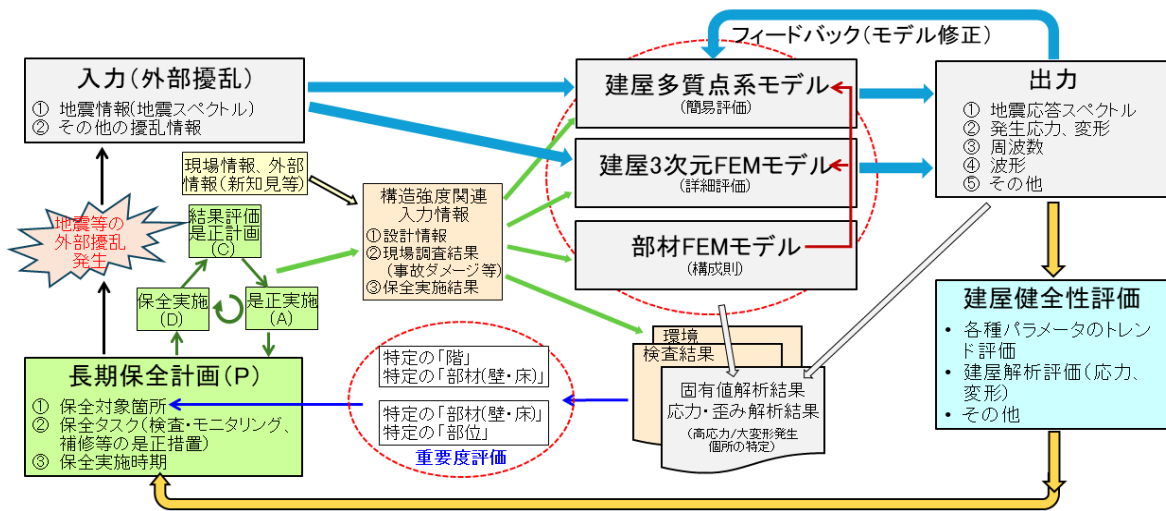


図 3. 4-8 本研究の中における長期保全計画の位置付け

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・モニタリングで得られるデータを反映して構築され、新しい情報が得られる都度、その情報は反映されて解析モデルは精緻化される。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つの要素から成り、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 要素から成る。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ため、そのような時期としては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 3.4-9 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を検討する。

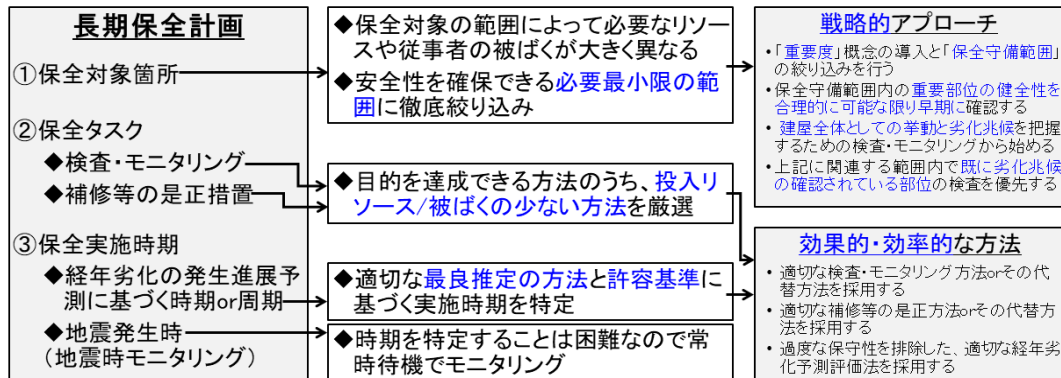


図 3.4-9 長期保全計画のイメージ

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 3.4-10）。この考え方にに基づき、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。

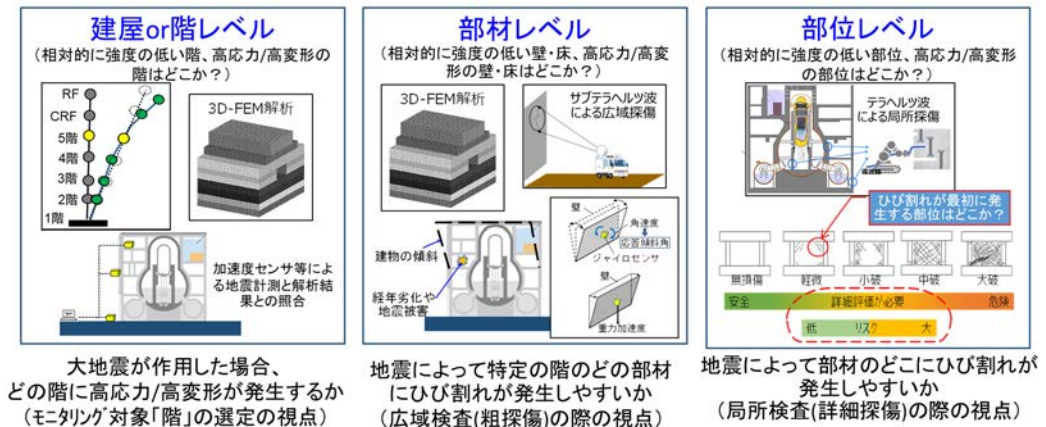


図 3.4-10 建屋の着目すべき箇所と検査・モニタリング方法

(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
- ・ 「保守準備範囲」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 3.4-11）。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 3.4-12 に示すシナリオで発生・進展することを想定している。このシナリオについては今後さらに調査を実施し、必要に応じて見直す予定である。

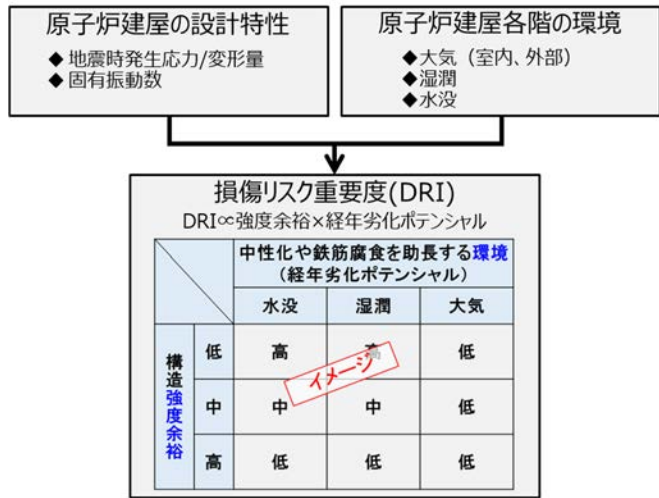


図 3.4-11 「損傷リスク重要度」概念の導入

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を踏まえ、地下階等の低層階及び PCV（Primary Containment Vessel：原子炉格納容器）シェル周辺壁が地震や事故で損傷している可能性は低いと考えられるので、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ある。もしこのようなアプローチが成立するとすれば、このような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るという効果的・効率的な方法が可能となる（図 3.4-13）。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 low と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する。

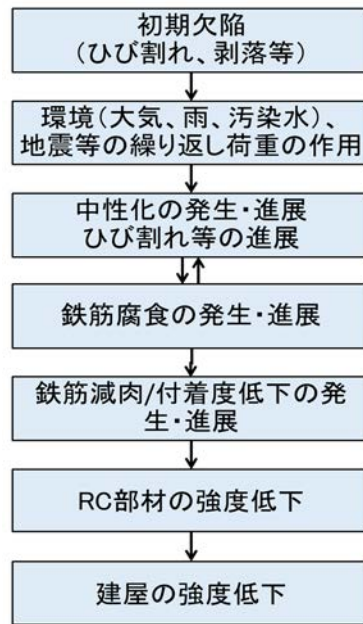


図 3.4-12 RC の劣化シナリオ

以上の議論をまとめて図示すると、図 3.4-14 のようになる。

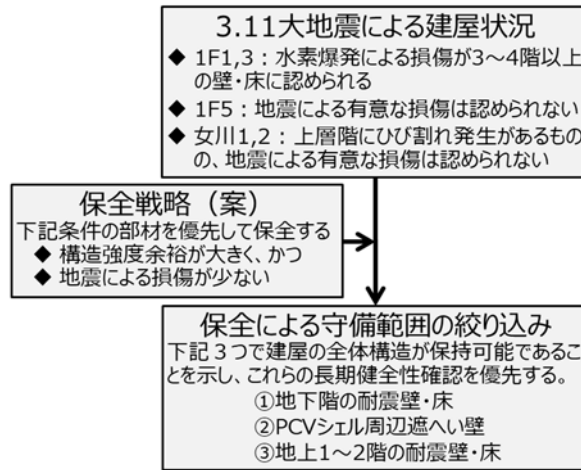


図 3. 4-13 「保全守備範囲」の絞り込み

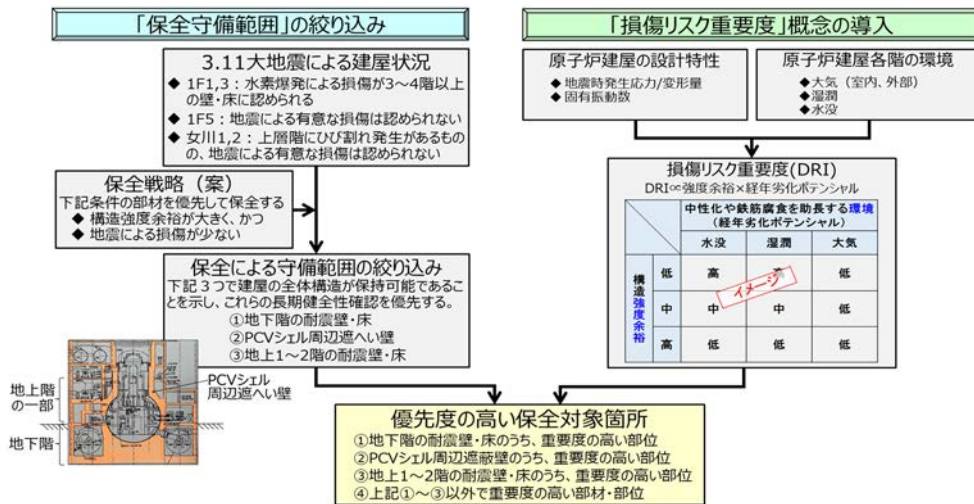


図 3. 4-14 「保全守備範囲」の絞り込みと「重要度」概念の導入

(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措置）を実施するには、検査・モニタリング及び補修等の是正措置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. 4-10 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求し、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・モニタリング計画を検討する。この計画で得られた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. 4-15、図 3. 4-16）、極めて重要である。

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ため注意が必要である。

● 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。

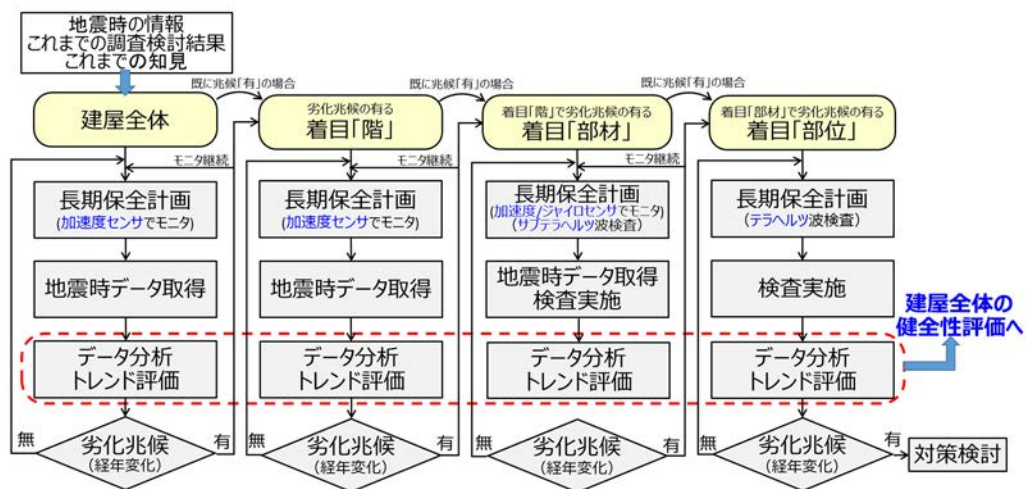


図 3.4-15 検査・モニタリングで得られるデータ・情報と建屋健全性評価の関係

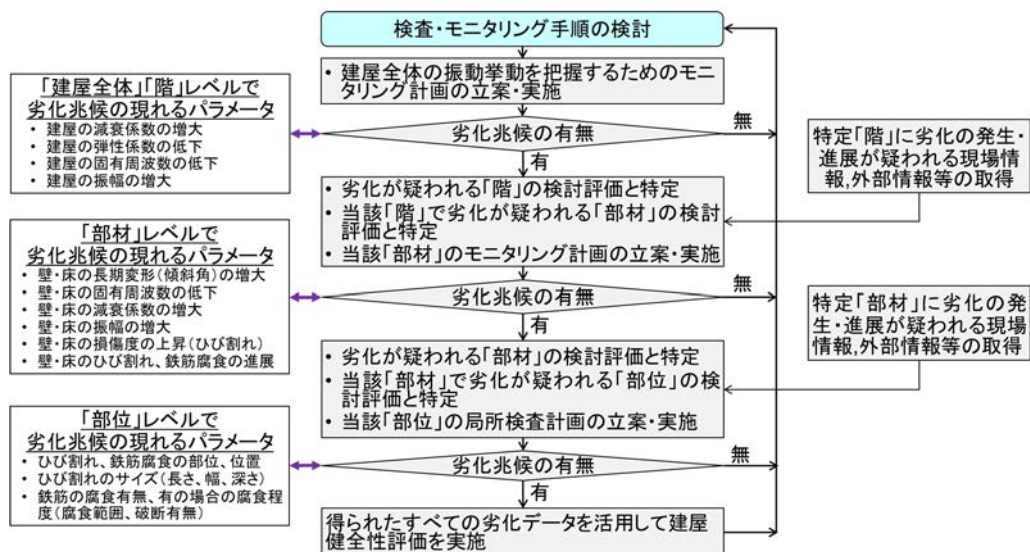


図 3.4-16 検査・モニタリング手順と劣化兆候の現れるパラメータの関係

## (c) 保全実施時期に関する検討

保全タスク（検査・モニタリング及び補修等の是正措置）の実施時期は、通常、経年劣化の進展予測結果に基づき十分健全性を確保できる時点で次回検査や是正の時期を決める。この時、劣化進展速度を過度に保守的に設定しすぎると、検査インターバルが短くなり、リソースの消耗につながるため、できるだけ保守性を排除した設定が必要となる。

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。この点については引き続き検討を継続する。

一方、地震時に建屋の応答を測定してそのデータを分析・評価することで建屋の健全性を評価することは、最も有力な方法の1つである。地震の発生する時期を予測することは困難であるので、地震応答を常時モニタリングできるようにする必要がある。そのためには、加速度センサやジャイロセンサを建屋に設置すること、及びその後の保全を実施することを検討する必要がある。高放射線量率等のため、建屋への接近性が限られていることを考慮し、適切な設置場所やモニタリングシステムの構成、maintainability 等を検討する必要がある。この点についても引き続き検討を継続する。

## ※ 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、保全タスク、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。次年度（令和5年度）も引き続きこれらについて検討し、具体的な長期保全計画の例を示す予定である。

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4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	2022.5.9 15:00-17:00	Web会議	(東北大)前田、青木、堂崎、西脇、Monical、Benjamin、小林、堀 (岡山大)Hamood (東工大)西村 (芝浦工大)田邊、大橋 (木更津高専)藤井 (日本工大)田中 (大阪公立大)鈴木 (JAEA)上野、菖蒲	(1)研究課題(4)に関連して今年度の計画の課題及び全体の進め方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)本年度の年間スケジュールと主要行事について説明があり、その内容を確認した。 (3)東電との定期的な意見交換会の進め方について提案があり、その内容を参加者全員で確認した。特にコメントはなかった。 (4)研究課題(1)の今年度計画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(2)の今年度計画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)研究課題(3)の今年度計画について説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (7)中性子イメージング見学会をJAEA 原科研で開催する提案があり、希望者が参加することとなった。
第2回	2022.10.3 13:00-17:00	いわき ワシントン ホテル (一部 Web 参加)	(東北大)前田、青木、堂崎、西脇、Monical、Benjamin、小林、堀 (岡山大)Hamood (東工大)西村 (芝浦工大)田邊、大橋 (木更津高専)藤井 (日本工大)田中 (大阪公立大)鈴木 (JAEA)上野、菖蒲 (東電HD)吉田、堂埜、金谷、三浦	1.全体会議に先立ち、テラヘルツ波を用いた模擬材料の測定デモを行った。 2.令和4年度の研究内容と成果 (1)研究課題(1)の今年度の実施内容と成果の説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (2)研究課題(2)の今年度の実施内容と成果の説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (3)研究課題(3)の今年度の実施内容と成果の説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (4)研究課題(4)の今年度の実施内容と成果の説明があり、その内容を参加者全員で確認した。
第3回	2023.3.10 9:00-12:00	Web会議	(東北大)前田、青木、堂崎、西脇、Monical、Benjamin、易、佐田、Sujan、津田 (芝浦工大)田邊、大橋 (木更津高専)藤井 (日本工大)田中 (大阪公立大)鈴木 (JAEA)上野、菖蒲	(1)研究課題(4)の今年度の成果と最終イメージの説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (2)研究課題(3)の今年度の成果と次年度計画の説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (3)研究課題(2)の今年度の成果と次年度計画の説明があり、その内容を参加者全員で確認した。 (4)研究課題(1)の今年度の成果と次年度計画の説明があり、その内容を参加者全員で確認した。

② 研究課題グループ会議及び研究課題グループ間会議の開催

研究課題ごとに、また、関連する研究課題間で、随時会議を開催し、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4年度に実施した研究課題グループ会議及び研究課題グループ間会議の開催実績は表3.5-2に示す通りである。

表 3.5-2 研究課題ごとのグループ会議の開催実績 (1/2)

	開催日	開催場所	出席者	議題と意見交換の結果
課題(1)				
第1回	2022.9.29	Web会議	東北大：前田 東工大：西村 岡山大：Hamood	・進捗状況の報告・共有を行った。 ・10/3全体会議に向けた資料作成の確認を行った。
課題(2)(3)合同				
第1回	2022.4.21	Web会議	芝浦工大：田邊、大橋 木更津高専：藤井 日本工大：田中 東北大：西脇、堂崎、青木 JAEA：上野、菖蒲、栗田 大阪公立大：鈴木	・課題②から、テラヘルツ波計測実施状況の報告、及び中性子イメージング測定に関する試料送付における注意点の説明があった。 ・課題③から、テラヘルツ波装置の発注に関する報告及び備品発注の準備について報告があった。

表 3.5-2 研究課題ごとのグループ会議の開催実績 (2/2)

	開催日	開催場所	出席者	議題と意見交換の結果
第2回	2022.6.1	Web会議	芝浦工大：田邊、大橋 木更津高専：藤井 日本工大：田中 東北大：西脇、堂崎、青木 JAEA：上野、菖蒲、栗田	<ul style="list-style-type: none"> <li>課題②から、中性子イメージング測定の実験体、テラヘルツ波継続のビーム径に関する評価、含水率の評価のための測定準備、光源からの距離による出力変化、及びパルス照射での透過・反射波のシミュレーションに関する検討の進捗状況報告があった。</li> <li>課題③から、コンクリート粗骨材サブテラヘルツ評価及び高出力測定系構築に関する検討の進捗状況報告があった。</li> </ul>
第3回	2022.7.7	Web会議	芝浦工大：田邊、大橋 木更津高専：藤井 日本工大：田中 東北大：西脇、青木、堂崎 JAEA：上野、菖蒲、栗田 大阪公立大：鈴木	<ul style="list-style-type: none"> <li>課題②から、サブテラヘルツ波測定における干渉の影響、中性子によるコンクリートサンプル測定、及び亀裂に対する位相の影響等に関する検討の進捗状況報告があった。</li> <li>課題③から、凍結融解による亀裂を導入した実験体の作製、テラヘルツ光学系を用いた数メートル範囲の測定及び壁要素の地震による損傷のシミュレーションに関する検討の進捗状況報告があった。</li> </ul>
第4回	2022.8.8	Web会議	芝浦工大：田邊、大橋 木更津高専：藤井 日本工大：田中 東北大：西脇、堂崎、青木 JAEA：上野、菖蒲、栗田 大阪公立大：鈴木	<ul style="list-style-type: none"> <li>保全学会において受け取ったテラヘルツ非破壊検査技術に関するコメントを基に議論を行った。</li> <li>レーダーとの比較検討を行った。</li> <li>日本工大での光学系構築についての進捗報告があった。</li> <li>田中先生の木更津高専訪問に関する報告があった。</li> </ul>
第5回	2022.9.7	Web会議	芝浦工大：田邊、大橋 木更津高専：藤井 日本工大：田中 東北大：西脇、堂崎、青木 JAEA：上野、菖蒲、栗田 大阪公立大：鈴木	<ul style="list-style-type: none"> <li>建築学会での非破壊検査技術に関する議論があった。</li> <li>レーダー干渉等の対策についての報告と議論があった。</li> <li>芝浦工大より、豊洲キャンパスへの移設後の装置組立状況の報告と干渉の制御に関する議論があった。</li> </ul>
第6回	2022.10.7	Web会議	芝浦工大：田邊、大橋 木更津高専：藤井 日本工大：田中 東北大：西脇、堂崎、青木 JAEA：上野、菖蒲、栗田 大阪公立大：鈴木	<ul style="list-style-type: none"> <li>腐食サンプルに対する材料と建築の各分野における理解をすり合わせるとともに実験項目を確認した。</li> <li>中性子イメージングのリファレンス構造を議論し、課題③での準備を確認した。</li> <li>カメラの調整方法と調整後の確認をウェブ越しに実施した。</li> </ul>
第7回	2022.10.31	長崎県端島(軍艦島)	芝浦工大：田邊 日本工大：田中 東北大：西脇、堂崎、青木 JAEA：菖蒲	<ul style="list-style-type: none"> <li>長崎県端島(軍艦島)のRC建物群の学術調査に加わり、建物群の経年劣化状態を観察した。この観察も参考に、今後の研究における試験等の検討に反映する。</li> <li>日本工大及び東北大での今後の試験について意見交換を行った。</li> </ul>
第8回	2022.11.11	Web会議	芝浦工大：田邊、大橋、島本 木更津高専：藤井 日本工大：田中 東北大：西脇、堂崎、青木、小林 JAEA：上野、菖蒲	<ul style="list-style-type: none"> <li>課題②から、中性子イメージング実施に係る測定内容とスケジュールの確認、鉄筋探査機の補完としてテラヘルツ波のパルス化と鉄系腐食生成物のテラヘルツ特性評価の実験に関する報告があった。</li> <li>課題③から、テラヘルツカメラを用いた研究状況について報告があり、カメラのスケール及び照射面の議論があった。</li> </ul>
第9回	2022.12.15	Web会議	芝浦工大：田邊 木更津高専：藤井 日本工大：田中、有田 東北大：西脇、堂崎、青木 JAEA：上野、菖蒲、栗田	<ul style="list-style-type: none"> <li>課題②から、種々のサンプルについての反射配置によるテラヘルツ測定の結果、低周波テラヘルツ応答の解釈、中性子イメージング測定におけるモデル試験体の解析進捗について報告があった。</li> <li>課題③から、力学的特性、ひび割れとテラヘルツ応答、テラヘルツカメラを用いた計測、鉄筋腐食による付着強度低下及び遠距離計測における透過・吸収測定に関する報告があった。</li> </ul>
第10回	2023.2.15	Web会議	芝浦工大：田邊、大橋 木更津高専：藤井 東北大：西脇、堂崎、青木 JAEA：上野 大阪公立大：鈴木	<ul style="list-style-type: none"> <li>課題②から、コンクリートサンプルの測定と、関連する化学試料の分析について報告があった。</li> <li>課題③から、テラヘルツカメラを用いたイメージ取得の取組状況の報告があった。</li> </ul>
課題 (3)				
第1回	2022.4.13	Web会議	東北大：西脇、原 日本工大：田中 大阪公立大：鈴木	<ul style="list-style-type: none"> <li>令和3年度報告書の内容を踏まえ、令和4年度研究計画について確認した。</li> <li>4/8の1F訪問での観察・東電との意見交換について議論した。</li> </ul>
第2回	2022.5.25	Web会議	東北大：西脇 日本工大：田中 大阪公立大：鈴木	<ul style="list-style-type: none"> <li>5/20,21のJAEA東海での中性子イメージングに関する実験について情報交換を行った。</li> <li>今年度の実験や解析に関する現状とスケジュールを確認した。</li> </ul>
第3回	2022.7.6	Web会議	東北大：原 日本工大：田中 大阪公立大：鈴木	<ul style="list-style-type: none"> <li>進捗状況の報告・共有を行った。</li> </ul>
第4回	2022.7.20	Web会議	東北大：西脇 日本工大：田中 大阪公立大：鈴木	<ul style="list-style-type: none"> <li>8/1の東電との意見交換会への対応について確認した。</li> <li>令和3年度報告書の修正への対応について確認した。</li> </ul>
第5回	2022.8.29	Web会議	東北大：西脇、原 日本工大：田中	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本建築学会での発表について確認した。</li> <li>進捗状況の報告・共有を行った。</li> </ul>
第6回	2022.12.21	Web会議	東北大：西脇 日本工大：田中 大阪公立大：鈴木	<ul style="list-style-type: none"> <li>進捗状況の報告・共有を行った。</li> <li>検討結果のまとめ方について確認・共有を行った。</li> </ul>
第7回	2023.3.1	Web会議	東北大：西脇 日本工大：田中 大阪公立大：鈴木	<ul style="list-style-type: none"> <li>3/10全体会議に向けた資料作成の確認を行った。</li> <li>SMiRT27への投稿について状況を共有した。</li> </ul>

(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4年度は下記を実施した。

- ① 1F を視察し、東電廃炉カンパニーの技術者と意見交換（令和4年4月8日実施）
- ② 長崎県端島（軍艦島）の RC 建物群の学術調査に加わり、建物群の経年劣化状態を観察（令和4年10月31日～11月2日実施）
- ③ NDF（Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation：原子力損害賠償・廃炉等支援機構）フォーラム（令和4年8月28日～29日開催）、NDF ワークショップ（令和4年9月10日開催）、FDR2022（International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research 2022：福島廃炉研究国際会議2022）（令和4年10月15日～16日開催）に参加し、1Fの廃炉に関する研究動向を把握
- ④ 第8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）の関係者への周知と参加勧誘

(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電の技術者と意見交換することによって研究を推進した。東電との意見交換会の開催実績を表 3.5-3 に示した。

表 3.5-3 東電との意見交換会の開催実績（1/2）

	開催日時	開催場所	出席者	議題と意見交換の結果
第1回	2022.5.11 15:00-16:50	Web 会議	東電側：石川, 井上, 金谷, 三浦, 吉田, 堂埜 大学側：前田, 青木, 堂埜, Brito, 易 (東北大), 鈴木(大阪公立大), 上野, 菖蒲 (JAEA), 藤井(木更津高専), 田中(日本工業大), 西村, Pradhan, 大戸(東工大), Hamood(岡山大), 大橋(芝浦工大)	大学側より全体概要、課題①応答モニタリング、課題②損傷検知、課題③材料・部材性能評価及び④構造健全性評価の概要説明後、意見交換を行った。 意見交換では、各説明に対する内容確認、大学側での検討に必要な設計情報の提供に関する相談、事故炉の原子炉建屋に対する耐震性判定基準に関する議論等が行われた。次回は、課題①に関する設計情報の提供に関して大学側より要望内容を事前に提示した上で東電側より情報提示と説明を行うこととした。
第2回	2022.6.13 16:30-17:40	Web 会議	東電側：石川, 金谷, 三浦, 吉田, 堂埜, 戸島, 草苺 大学側：前田, 青木, 堂埜, Brito, 易, Monical(東北大), 鈴木(大阪公立大), 田邊(芝浦工大), 上野 (JAEA), 藤井(木更津高専), 田中(日本工業大), 西村, Pradhan, 大戸(東工大), Hamood(岡山大), 大橋(芝浦工大)	大学側より課題①について提示された設計情報提供の要望に対し東電側より情報提示と説明を行い、意見交換を行った。 意見交換では、東電側より提示された設計情報についての管理手続き等の確認、提示図面についての確認、建屋全体の健全性を考える上での要注意部位、構造等についての議論等があった。次回は課題②について大学側より詳細内容の説明を行い意見交換することとした。
第3回	2022.7.11 16:00-17:10	Web 会議	東電側：石川, 金谷, 三浦, 吉田, 堂埜, 戸島 大学側：田邊(芝浦工大), 藤井(木更津高専), 上野, 栗田(JAEA), 西村(東工大), 前田, 西脇, 青木, 堂埜, Benjamin, 津田(東北大)	大学側より、課題②のテラヘルツ波を用いた探傷法の原理、特徴等の説明を行い、意見交換を行った。 意見交換では、説明内容に関する確認、テラヘルツ波を用いた探傷法の用途に関する議論、1Fでの試適用可能性についての議論等があった。 次回は課題③の材料・構造物の性能評価法について大学側より詳細内容の説明を行い意見交換することとした。
第4回	2022.8.1 16:00-17:00	Web 会議	東電側：石川, 金谷, 三浦, 吉田, 堂埜 大学側：西脇, 前田, 青木, 堂埜, 津田(東北大), 田中(日本工大), 鈴木(大阪公立大), 田邊(芝浦工大), 上野, 菖蒲, 栗田(JAEA)	大学側より課題③の材料・構造物の性能評価法について、サブテラ（テラ）ヘルツ画像から力学性能の低下程度・範囲を把握するまでの流れを中心に説明を行い、意見交換を行った。 意見交換では、1Fでの想定劣化程度、現場でのサンプル取得可能性、試験で与える劣化要因と実物の違いについての議論等があった。 次回は課題④の総合的建屋安全性評価手法を中心に課題①の一部を含め大学側より詳細内容の説明を行い意見交換することとした。



表 3.5-3 東電との意見交換会の開催実績 (2/2)

	開催日時	開催場所	出席者	議題と意見交換の結果
第5回	2022.9.5 10:00-11:00	Web会議	東電側：石川, 金谷, 三浦, 吉田, 堂埜, 戸島 大学側：前田, 青木, Monical, Benjamin, 易, 大野, 堂崎, 津田(東北大), 西村(東工大), 田邊 (芝浦工大), 上野(JAEA)	大学側より課題①-1の復元力特性の評価及び課題④の総合的な建屋安全性評価手法に関する概要と進捗の報告、ならびに相談事項の説明を行い、意見交換を行った。 意見交換では、説明内容の確認、相談事項として提示されたせん断変形角の判断基準、設計上の目標性能、1Fサイトでの研究成果の試適用についての議論等があった。 今回までで一通り全体概要と各課題についての説明と意見交換を終え、次回は研究全体の進め方について意見交換を行うこととした。

また、前述した研究課題ごとのグループ会議及び研究課題間のグループ会議、全体会議などの他、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 廃炉研究開発連携会議や原子力機構廃炉基盤研究プラットフォー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。

日本原子力学会秋の大会 2022（令和4年9月7日～9日開催）で、本研究の全体概要について発表した<sup>[3.5-1]</sup>。

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、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中である。原子力学会春の年会 2023（令和5年3月13日～15日開催）で、本検討の実施状況について報告した<sup>[3.5-2]</sup>。

#### 4. 結言

本報告書は、令和3年度に英知事業の1つとして採択された「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4年度の研究成果について取りまとめたものである。

原子力事故を経験した原子力発電所は、高放射線量率のため、現場への接近性が極端に限られ、事故やその後の地震などの外乱による損傷などの情報収集、さらには、長期を要する廃炉が完了するまでの間、安全性を確保するための保全活動が極めて困難である。また、水没したひび割れ部などにおける経年劣化が進行すると、将来、修復に莫大な費用と時間を要し、廃炉工程の遅延を招く虞がある。本研究は、そのような原子力発電所における原子炉建屋の長期構造健全性を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2年目である令和4年度は、令和3年度の成果を踏まえ、下記の項目について試験、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ができた。

- (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
- (5) 研究推進

以上、令和4年度の研究は大きな障害・問題もなく、当初計画通り、成果を挙げることができた。令和5年度は、当初計画に従って研究を進め、最終年度として成果を取りまとめる。

以上

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](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] 東北大学，里見ビジョン（SATOMI VISION 2013），  
[https://www.tohoku.ac.jp/japanese/profile/president/01/president0101/SATOMI\\_VISION2013.pdf](https://www.tohoku.ac.jp/japanese/profile/president/01/president0101/SATOMI_VISION2013.pdf)（参照：2023年4月13日）。
- [IV] 東北大学，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](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）。

3.1.1 項

- [3.1.1-1] Biggs, J. M., “Introduction to Structural Dynamics,” McGraw-Hill, Chapter 2: Rigorous Analysis of One-degree Systems, pp. 51-54, 1964.
- [3.1.1-2] Ancheta, T., Darragh, R., et al., “NGA-West2 Database,” Earthquake Spectra, Vol. 30, No. 3, pp. 989-1005, 2014.
- [3.1.1-3] Housner, G. W., “Spectrum Intensities of Strong-Motion Earthquakes,” Proceedings of the Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, Los Angeles, California. Earthquake Engineering Research Institute, pp. 20-36, 1952.
- [3.1.1-4] Newmark, N. M., “A Method of Computation for Structural Dynamics,” Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 85, No. EM3, pp. 67-94, 1959.
- [3.1.1-5] Yang KH, Park HG, “Damping ratio of RC squat wall with limited damage under high-frequency earthquake,” Journal of structural engineering, ASCE., Vol. 1, No. 147, pp. 1-15, 2021.
- [3.1.1-6] Ji X, Fenves GL, et al. “Seismic damage detection of a full-scale shaking table test structure,” Journal of structural engineering, ASCE., Vol. 1, No. 137, pp. 14-21, 2011.

3.1.2 項

- [3.1.2-1] 前田 匡樹，ほか：連層耐震壁を有するRC造4層建物縮小試験体の振動台実験による被災度評価と応答予測 その1 研究の位置づけと実験計画の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 441-442，2020.9.
- [3.1.2-2] Alex Shegay，ほか：連層耐震壁を有するRC造4層建物縮小試験体の振動台実験による被災度評価と応答予測 その2 実験結果概要，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 443-444，2020.9.

- [3.1.2-3] 三浦耕太, ほか, 連層耐震壁を有する RC 造 4 層建物縮小試験体の振動台実験による架構の破壊形式と安全限界の評価, 日本建築学会構造系論文集, pp. 247-257, 2021. 2.
- [3.1.2-4] 日本建築防災協会, 2015 年改訂版 再使用の可能性を判定し, 復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2016. 3.
- [3.1.2-5] 梨本優也, 菊池友介, 鈴木裕介, 前田匡樹, 地震時応答観測データのフィードバックによる逐次修正解析モデルを用いた RC 造建物の即時被災度判定, 日本建築学会技術報告集, 第 23 巻第 54 号, pp. 497-500, 2017. 6.
- [3.1.2-6] 田畑 佑, 藤田 起章, 三浦 耕太, 前田 匡樹, 加速度センサ記録に基づいた解析モデルの修正による RC 造建物の応答推定手法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 第 42 巻第 2 号, pp. 679-684, 2020. 7.
- [3.1.2-7] Kangqian Xu, Akira Mita, Estimation of maximum drift of multi-degree-of-freedom shear structures with unknown parameters using only one accelerometer, Structural Control and Health Monitoring, 28, 9, e2799, 2021.
- [3.1.2-8] Pan, Haoran, Earthquake ground motion estimation for buildings using absolute floor acceleration response data, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 51, 4, pp. 896-911, 2022.
- [3.1.2-9] 武田寿一, 鉄筋コンクリート建物の動的計算, コンクリートジャーナル, 12, 8, pp. 33-41, 1974.
- [3.1.2-10] 梅村魁, 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法・続 (中層編), 技報堂出版, 1982.
- [3.1.2-11] 梅村恒, ほか, 繰り返しによる耐力低下を考慮した鉄筋コンクリート部材の復元力特性のモデル化 (耐震一般) コンクリート工学年次論文報告集, 20, 8, pp. 1015-1020, 1998.

### 3.1.3 項

- [3.1.3-1] 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, p. 22, 平成 23 年 5 月 16 日, [https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11\\_j/images/110516ab.pdf](https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110516ab.pdf) (参照: 2023 年 4 月 20 日) .

### 3.3.1 項

- [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, 27 (2005) pp. 757-762.

### 3.3.2 項

- [3.3.2-1] 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針 (案)
- [3.3.2-2] 道正素弘, 小島正朗, 鉄筋腐食ひび割れ幅による鉄筋腐食量の推定に関する研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 1180-1185, 2014.
- [3.3.2-3] 李 翰承, 野口貴文, 友澤史紀, 引張主筋の腐食した RC 梁の有限要素法による耐力性能評価に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集 No. 506, pp. 40-50, 1998. 4.
- [3.3.2-4] 上田浩次, 宮田康史, 神取祐治, 谷寄徹也, 鎌倉友男, 準ミリ波を利用した路面上の水と氷の判別方向, 計測自動制御学会論文集, Vol. 54, No. 3, pp. 331-339, 2018.

### 3.3.3 項

- [3.3.3-1] 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, pp.447-454, 2017.
- [3.3.3-2] 柳下和男, 福沢六郎, 千葉脩, 羽鳥敏明, 金子治, 建屋の復元力特性に関する研究 その61 耐震壁のせん断ひび割れ本数およびひび割れ幅の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1121-1122, 1986.
- [3.3.3-3] Eurocode2: Design of concrete Structures, Part 1-2, General rules-structural fire design, The European Standard EN1992-1-2, 2004.
- [3.3.3-4] F. J. Vecchio, M. P. Collins: Compression response of cracked reinforced concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.119, No.12, pp.3590-3610, 1993.12.
- [3.3.3-5] Selby, R. G., and Vecchio, F. J. Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tech. Rep. 93-02, Univ. Toronto, dept. Civil Eng., Toronto, Canada, 1993.
- [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, 第529号, pp.1-6, 2000. 3月.
- [3.3.3-8] 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018.
- [3.3.3-9] 日本建築防災協会, 2015年改訂版 再使用の可能性を判定し, 復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2016.

### 3.4 節

- [3.4-1] 原子力損害賠償・廃炉等支援機構, 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](https://dd-ndf.s2.kuroco-edge.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20221011_SP2022FT.pdf) (参照: 2023年4月3日).

### 3.5 節

- [3.5-1] 堂崎浩二, 青木孝行, 前田匡樹, 「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-英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業-」の進捗状況, 日本原子力学会秋の大会2022 予稿集 3B02, 2022. 9.
- [3.5-2] 堂崎浩二, 田邊匡生, 藤井翔, 西脇智哉, 青木孝行, テラヘルツ波による非破壊検査技術の確立のために必要な研究開発課題の抽出検討, 日本原子力学会春の年会2023 予稿集 1G15, 2023. 3.

This is a blank page.



