

データプラットフォーム拠点形成事業（防災分野）

首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト

サブプロジェクト（c）

「非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ
収集・整備」

（平成 29 年度）

成果報告書

平成 30 年 5 月

国立研究開発法人防災科学技術研究所

はじめに

わが国は世界でも有数の地震大国であり、これまでに幾度となく甚大な物理的・人的・経済的被害をうけてきました。特に、過去に甚大な被害をもたらしてきた首都直下地震や南海トラフ地震については、地震調査研究推進本部地震調査委員会の長期評価によれば、今後30年以内の地震発生確率はどちらも70%程度であり、その切迫性が高まっています。

3,800万人を擁する世界最大の都市圏における首都直下地震については、内閣府より、首都機能の喪失をはじめその経済被害想定額が95兆円と試算されており、社会的懸案事項として捉えられています。こういった自然災害に対応するため、最先端の防災科学技術を一層推進すべく、「経済財政運営と改革の基本方針2016(平成28年6月2日閣議決定)」、「日本再興戦略2016—第4次産業革命に向けて—(平成28年6月2日閣議決定)」、「科学技術イノベーション総合戦略2016(平成28年5月24日閣議決定)」といった政府の基本方針が定められています。

わが国の現在の防災力ではこうした大規模地震災害の被害を完全に予防することはできず、残された時間の中で少しでも被害を減らすこと、高い事業継続能力を持つこと、速やかな復旧・復興を実現することで災害に対するレジリエンスを向上させることが課題です。

一方で、2015年5月に発生した小笠原諸島西方沖地震では、大きな被害こそ発生しなかったものの、首都圏における約2万機のエレベータの停止、交通機関の乱れ、ライフラインの一時停止等が生じ、事業の中断や経済機会損失にもつながっており、このように比較的頻度の高い中規模地震への備えの充実も決して看過することができません。

また、政府では、急速に成長するアジアをはじめとする世界の観光需要を取り込み『観光先進国』への新たな国づくりに向けて邁進していることから、災害発生時の訪日外国人旅行者向けの対策も重要な課題です。

特に、都市機能、人口が集中し、社会経済活動の中核でありわが国の頭脳となっている首都圏においては、災害に対する脆弱性を内在していることから、首都機能の維持を図るため、詳細に災害リスクを評価するとともに発災に備えた対策を施しておくことは、これまでも増して重要かつ喫緊の課題となっています。

そこで、本プロジェクトにおいては、以下に掲げる3つのサブプロジェクトの推進、有機的連携を通じて、官民一体の総合的な事業継続や災害対応、個人の防災行動等に資するデータの収集・整備を目指します。

- (a) 首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上に資するデータ利活用に向けた連携体制の構築
- (b) 官民連携による超高密度地震動観測データの収集・整備
- (c) 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備

本プロジェクトの推進に当たっては、防災科研が有する、又は管理・利用する研究開発基盤（施設・設備・リソース等）を活用した大学等との連携方策等について提案を募り、オールジャパンによる研究推進体制を構築し、本プロジェクト終了時における研究開発成果の最大化を図ります。

本報告書は「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト」のうち、「(c) 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備」に関する、平成 29 年度の実施内容とその成果を取りまとめたものです。

「(c) 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備」では、センシングデータに基づく迅速な継続使用可否・機能損失度・崩壊余裕度判定によって、地震直後の首都圏の機能ロスを最小限に抑制し、その後の速やかな復旧・復興に寄与することを目的としています。具体的には、住宅密集地域の速やかな損傷度判定、行政庁舎・病院・帰宅支援ステーション等の防災拠点候補建物の速やかな選別を目的として、国立研究開発法人防災科学技術研究所が所有する実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）を活用し、実物を再現した建物モデルの振動台実験を行って、非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータを収集・整備します。キーワードは、広域被害推定・危険度判定、安全度（危険度）即時評価、継続使用性即時判定、高機能設備性能評価、機能維持・損失判定、となります。

目次

はじめに	i
目次	iii
1. プロジェクトの概要	1
1.1 目的	1
1.2 各課題の概要	1
2. 研究機関および研究者リスト(サブプロ c)	3
3. 研究報告	4
3.3 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備	4
3.3.1 簡易・広域センシングを用いた広域被害推定・危険度判定	4
3.3.2 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定	11
3.3.3 災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定	19
3.3.4 室内空間における機能維持	28
3.3.5 データ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討	37
4. 活動報告	43
4.1 サブプロジェクト(c) 運営委員会議事録	43
4.2 対外発表	47
5. むすび	48

1. プロジェクトの概要

1.1 目的

サブプロジェクト(c)では、都市の防災拠点となす建物（行政庁舎、体育館、帰宅支援ステーション等）における安全点検の自動化並びに避難者の迅速な安全確保、都市の中核となす建物の機能維持（事業の継続や生活の確保）と速やかな回復（損傷の同定や修復）、住宅密集地域における保全を目的として、国立研究開発法人防災科学技術研究所が所有する実大三次元震動破壊実験施設（Eーディフェンス）を活用し、非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータを収集・整備する。また、自然地震の建物への影響を把握するため、サブプロジェクト(b)が取得する地盤－建物系に設置されている地震計のデータ等を利用・整備する。具体的に以下の業務を行う。

- (1) 簡易・広域センシングを用いた広域被害推定・危険度判定
- (2) 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定
- (3) 災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定
- (4) 室内空間における機能維持
- (5) データ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討

1.2 各課題の概要

(1) 簡易・広域センシングを用いた広域被害推定・危険度判定

簡易で安価な普及型センサのデータや既設の広域地震観測網の情報などを統合した、住宅密集地域の広域被害推定手法および地域別危険度判定手法の研究開発を行う。具体的には、耐震性能の異なる種々の木造住宅を対象に、大型振動台実験や高度数値解析によって、建物が損傷から崩壊に至るまでの挙動と各種普及型センサから得られるデータを関連づけ、既存の木造建物応急危険度判定および自治体住宅再建判定への支援・連携を意識した、センシング技術に基づく広域被害・危険度高度判定法を提案する。

(2) 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定

行政庁舎や体育館など、災害時拠点となる既設の建物内に少数のセンサを設置し、地震後速やかに建物安全性、崩壊余裕度、および継続使用の可否等を判定するシステムの構築を目指す研究開発を行う。具体的には、構造躯体のみならず設備・非構造部材をも再現した実物建物を大型振動台実験により損傷させ、センサによって検知した建物の揺れのデータをもとに、躯体から設備・非構造部材までの損傷レベルを即時に評価する技術、および崩壊余裕度の定量的評価に基づく施設の継続使用性判定手法を提案する。

(3) 災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定

災害時にも継続的な運用が期待される地域医療の中核病院等を対象に、地震直後にその機能損失度を定量的に評価する手法を提案し、無用な混乱を回避し安全かつ効率的な管理者の被災後運用判断を支援する仕組みに関する研究開発を行う。具体的には、高機能設備

を付した病院建物に対する大型振動台実験を実施し、建物崩壊余裕度、病院機能の低下要因の特定、高機能設備個別の性能評価、施設の機能損失に関する定量的判定法を提案する。

(4) 室内空間における機能維持

非構造部材、屋内設備、家具、什器等に関して、地震時の損傷挙動データを収集するとともに、損傷被害検証手法のガイドライン、被害対策法、地震被害センシング手法を提案する。具体的には、各種非構造部材の地震損傷が再現可能な大型振動台実験用試験体（主要構造部材は無損傷に留め、そこに取り付ける非構造部材を実験毎に取り換えることで、繰り返し使用が可能な実験ユニット）を製作し、さまざまな地震動に対して各非構造部材の損傷に関するデータを収集・蓄積する。さらに、それらのデータを整備・検討して、被害モニタリング手法の構築をめざす。

(5) データ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討

(1)～(4)で今後実施される 4 つの E-ディフェンスによる大型振動台実験の成果、これまでに E-ディフェンスで実施された各種実験のデータ、既設の常時地震観測記録等の情報を収集・整理・統合し、さらには今後のセンサ普及を前提とした応急的な広域危険度・被害度判定の枠組みの検討・提案もあわせて行い、今後の防災への利活用方策検討、および一般・関連団体等への公開・普及を図る。

2. 研究機関および研究者リスト(サブプロc)

所属機関	役職	氏名	担当課題
早稲田大学理工学術院	教授	西谷 章	研究統括 3.3.5
防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター	センター長	梶原 浩一	研究統括
名古屋大学減災連携研究センター	准教授	長江 拓也	3.3.1
名古屋大学減災連携研究センター	研究員	ジェム ヨニ ドアン	3.3.1
株式会社日建設計	主管	山田 祥平	3.3.1
国土交通省国土技術政策総合研究所	主任研究官	柏 尚稔	3.3.1
豊橋技術科学大学大学院工学研究科	助教	林 和宏	3.3.1, 3.3.4
防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター	副センター長	井上 貴仁	3.3.1
東京大学地震研究所	教授	楠 浩一	3.3.2
東京大学大学院新領域創成科学研究科	准教授	清家 剛	3.3.2
広島大学大学院工学研究院	准教授	日比野 陽	3.3.2
建築研究所構造研究グループ	主任研究員	向井 智久	3.3.2
大阪大学大学院工学研究科	准教授	真田 靖士	3.3.2
広島大学大学院工学研究院	教授	大久保孝昭	3.3.2
広島大学大学院工学研究院	助教	寺本 篤史	3.3.2
大林組技術研究所	所長	勝俣 英雄	3.3.2
大林組技術研究所構造技術研究部	副部長	米澤 健次	3.3.2
防災科学技術研究所地震減災実験研究部門	主任研究員	中村いずみ	3.3.2
防災科学技術研究所地震減災実験研究部門	主任研究員	松森 泰造	3.3.2
京都大学防災研究所	准教授	倉田 真宏	3.3.3
防災科学技術研究所	主任研究員	河又 洋介	3.3.3
京都工芸繊維大学工芸科学研究科	教授	金尾 伊織	3.3.3
京都大学医学部附属病院	准教授	大鶴 繁	3.3.3
九州大学人間環境学研究院	准教授	松尾真太郎	3.3.3
京都大学工学研究科	助教	藤田 皓平	3.3.3
京都大学医学部附属病院	技師長	相田 伸二	3.3.3
京都大学医学部附属病院	医員	堤 貴彦	3.3.3
京都大学防災研究所	研究員	Konstantinos Skalomenos	3.3.3
京都大学防災研究所	研究員	張 雷	3.3.3
防災科学技術研究所	主任研究員	佐藤 栄児	3.3.4
防災科学技術研究所地震減災実験研究部門	主幹研究員	藤原 淳	3.3.4
防災科学技術研究所地震減災実験研究部門	特別研究員	豊吉 巧也	3.3.4
早稲田大学理工学術院	教授	谷井 孝至	3.3.5
早稲田大学理工学術院	教授	高口 洋人	3.3.5
足利工業大学工学部	准教授	仁田 佳宏	3.3.5

3. 研究報告

3.3 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備

3.3.1 簡易・広域センシングを用いた広域被害推定・危険度判定

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

- ・簡易で安価な普及型センサのデータや既設の広域地震観測網の情報などを統合した、住宅密集地域の広域被害推定手法および地域別危険度判定手法の研究開発を行う。具体的には、耐震性能の異なる種々の木造住宅を対象に、大型振動台実験や高度数値解析によって、建物が損傷から崩壊に至るまでの挙動と各種普及型センサから得られるデータを関連づけ、既存の木造建物応急危険度判定および自治体住宅再建判定への支援・連携を意識した、センシング技術に基づく広域被害・危険度高度判定法を提案する。

(b) 平成 29 年度業務目的

- ・研究 2 年目の E-ディフェンスによる大型振動台実験に向けて、実験計画（試験体設計、加振計測計画策定、各種センシングシステムの開発）を立案する。更に、実験で用いる試験体の一部を先行して製作し、その性能を個別要素試験によって事前評価する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
名古屋大学 減災連携研究センター	准教授	長江 拓也
名古屋大学 減災連携研究センター	研究員	ジェム ヨニドアン
株式会社日建設計	主管	山田 祥平
国土交通省国土技術政策総合研究所	主任研究官	柏 尚稔
豊橋技術科学大学 大学院工学研究科	助教	林 和宏
防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター	副センター長	井上 貴仁

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

- ・研究 2 年目の E-ディフェンスによる大型振動台実験に向けて、実験計画（試験体設計、加振・計測計画策定、各種センシングシステムの開発）を立案した。更に、実験で用いる試験体の一部を先行して製作し、その性能を個別要素試験によって事前評価した。

(b) 業務の成果

1) 試験体設計

本課題では地盤上の実大木造住宅を対象とし、埋設の各種地中配管と連結する実験条件を採用した（図 1）。具体的には、土槽内に深さ約 1.5 m の地盤を準備し、転圧、捨てコン、RC 造基礎等、通常の施工手順に従い木造住宅を建設する。そして、地中配管を含む内外の住宅システムを総合的に機能させた状態で加振し、実際に起こりえる多様な物理的被害、機能損失を現出させる。このような条件下において、センサリングシステム、モニタリング技術を検証することによって、より実践的な技術開発を実現することができる。

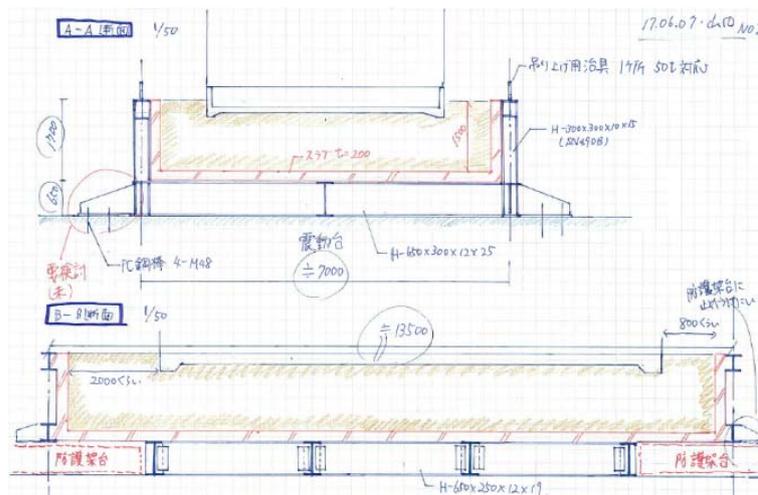


図 1 ベた基礎および周辺地盤を含む実験システムの提案（設計過程）

現在の木造密集地域の新しい住宅において多く見られ、また今後主流になりうる、3階建てのプランを採用し、軸組構法住宅と枠組壁構法住宅の2棟を実験する（図 2）。加振を重ね、崩壊確認までを予定するため防護架台を使用する計画とした。耐震等級2もしくは耐震等級3の設計規定に準じて、2棟に同等の構造性能を与える。地盤については、深さの条件を変えて応答性状を比較することで、住宅システム機能に与える影響を検証する。

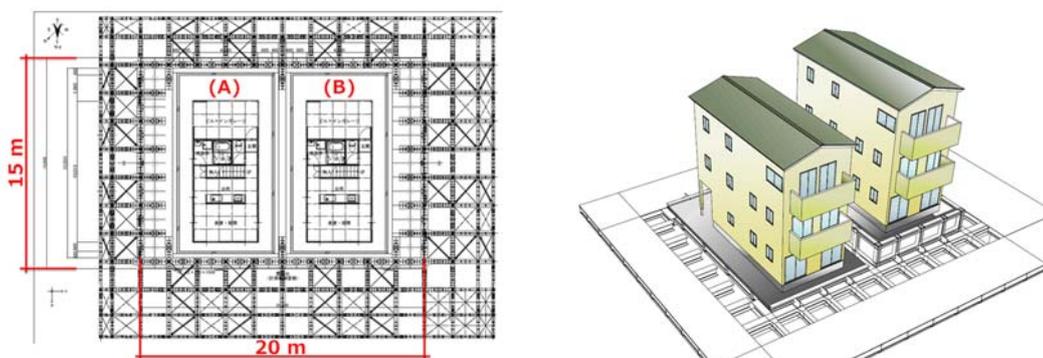


図 2 軸組構法と枠組壁構法の2棟に対する実験

鋼製土槽・地盤・住宅からなる実験システム 2 基の製作は、Eーディフェンスの屋外制作ヤードにて実施する。施設使用期間に屋内へ搬入、振動台上に設置する。移動、吊り上げ時の計画を図 3 に示す。鋼製土槽の内側には RC 造の床と壁（200 mm 厚）を施工する。移動時には、900 ton キャリアで土槽を下から支える必要がある。土槽製作時には、長辺方向中央に高さ 1.6 m のキャリア挿入空間を確保する。地盤製作の後、通常の手順で住宅を建設する。住宅を含む実験システムの総重量は約 380 ton と評価された。吊り上げ時には常設の 400 ton クレーン 1 台を用いる。3 階建て住宅の頂部をかわす条件で、鋼製吊り治具を設計した。製作時、移動時、吊り上げ時について、許容応力度設計により安全性を検証し、たわみ計算により変形制限を検定した。

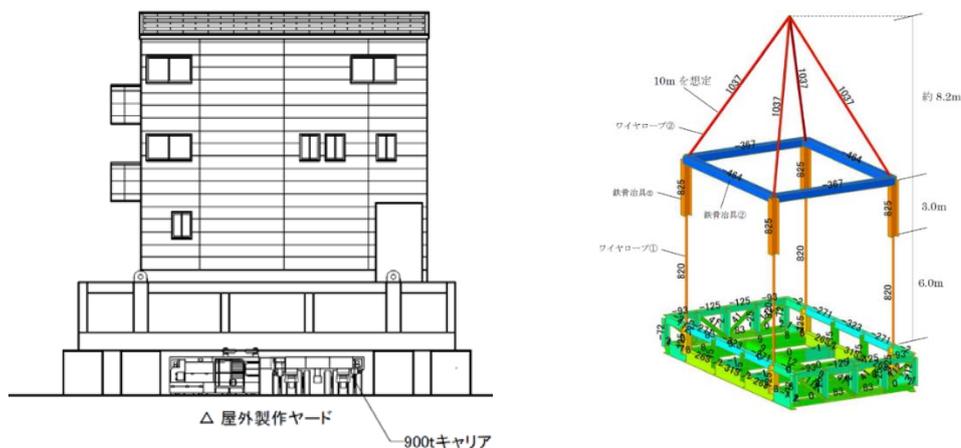


図 3 製作計画および移動設置計画の策定

2) 試験体の一部を製作・試験・性能検証、および加振・計測計画・モニタリング技術考察

軸組構法試験体の設計を終え、外構面の下層 2 層を対象に、内外装材、開口部材含む試験を計画した。図 4 に試験装置と試験体骨組を示す。本試験体の製作を、12 月より開始し、不二サッシ株式会社において運用される F 型層間変位試験装置を用いて 1 月に試験を実施した。

施工状況を図 5 に示す。RC 造基礎をカーテンウォール試験用の可動床に固定し、2 層目上部の梁中央にロードセル入りのピン治具を設置し上層の可動床に固定した。骨組接合部には一般的に流通する金物を用いた。中央の耐力壁には、たすき掛け筋交いが組み込まれている。

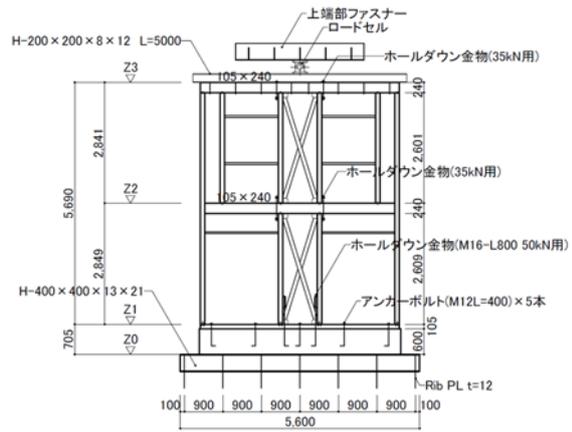
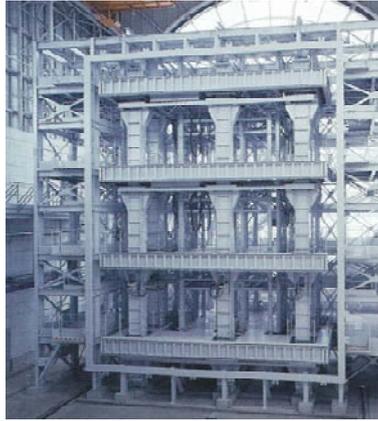


図 4 試験装置と骨組詳細（軸組構法）

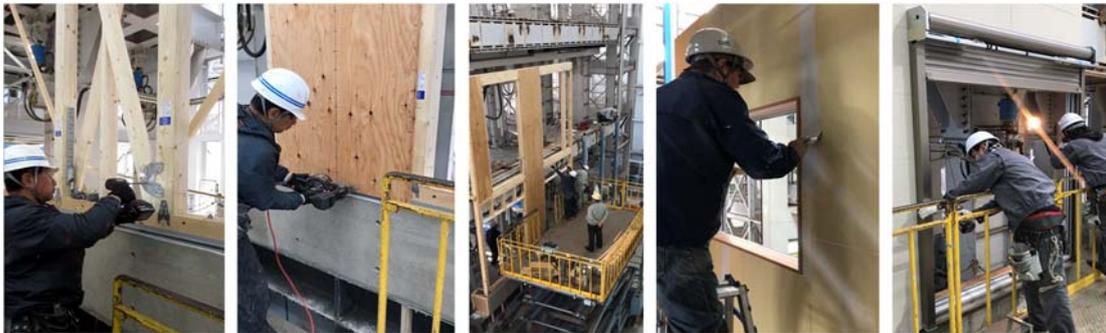


図 5 木造住宅部の検討例（軸組構法）

図 6 に試験状況を示す。载荷振幅を全体変形角により制御し、0.002 rad 相当の小振幅から 0.045 rad 相当の大振幅まで振幅を漸増させた。各振幅レベルで静的载荷、動的载荷を実施した。1 層目の層間変形角が 0.005 rad 程度で石膏ボードの開き、クロスの破れが生じた。層間変形角 0.015 rad 程度でサイディングボードの浮きが顕著となった。筋交い(30×90)は層間変形角 0.03rad 程度で座屈が顕著となり、石膏ボードを押し出した。柱脚のホールダウン金物は降伏しなかった。筋交いプレートは大きく塑性変形したがちぎれず、ビスの緩みもなかった。

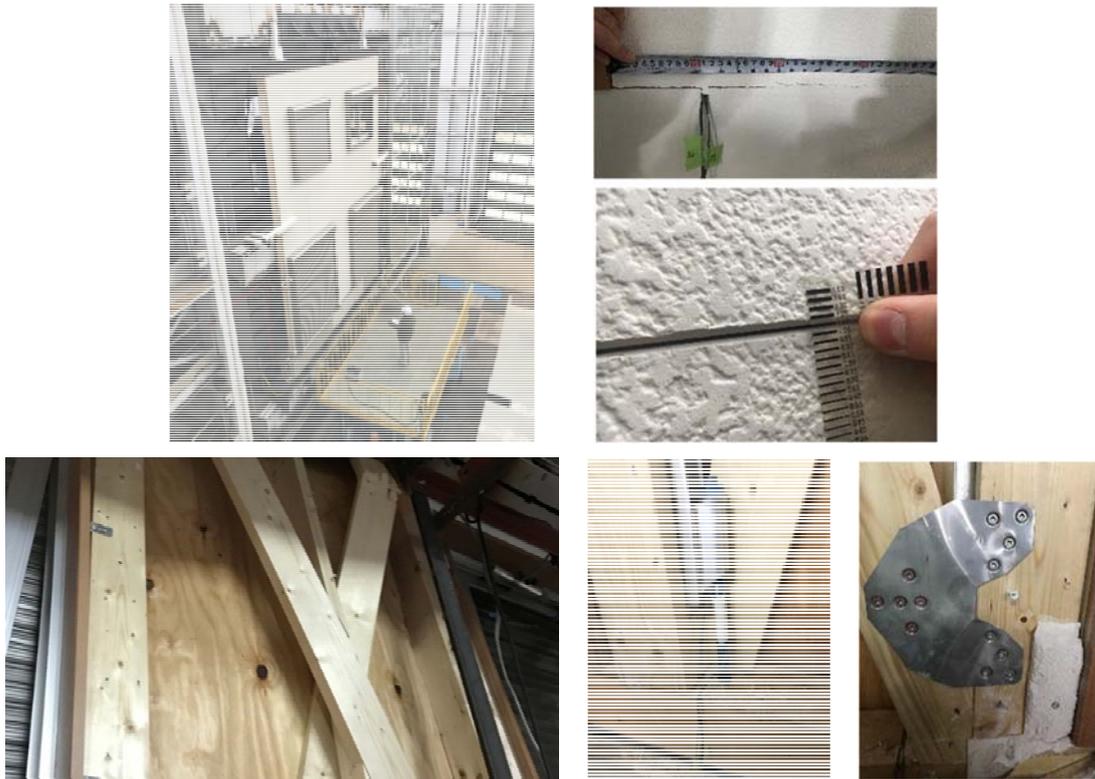


図 6 試験状況

損傷モニタリングに関して、シャッターのガイドフレーム内に MEMS センサを導入する技術開発の一環として、ジャイロを用いた部材角評価を試みた。ガイドフレームに設置した変位計による部材角評価 Frame R とガイドフレーム上に設置したジャイロによる部材角評価 CH3 は、ほぼ一致した。柱に直接設置したジャイロの評価値 CH2 が若干大きくなるのは、ビス止めしたガイドフレームと柱との間におけるずれが原因である。評価手法に反映すべき課題で、異なる条件における資料が必要である。

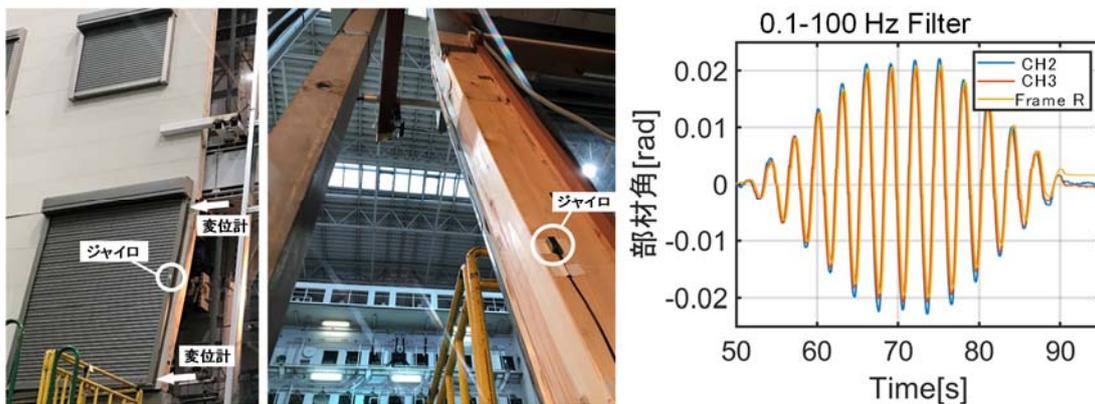


図 7 シャッターフレームに取り付けたジャイロの部材角評価

また、本試験において、実建物振動台実験において採用する各種計測方法を検証した。特に、内部空間確保のためには、壁面近傍に沿って床レベルから天井レベルまで

対角に巻き込み式変位計を設置し、幾何学計算することで、適切な精度の層間変形角評価が可能であることを確認した。大変形時に石膏ボード等が外れて計測線に触れ、計測を阻害する問題点に工夫が必要である。

実験システムの土台となる鋼構造土槽骨組については先行して製作し、二年目の前半より必要に応じて振動特性等を調査する計画とした。前述の応力計算の後、吊り上げ治具との連結部分、振動台との固定位置等の詳細設計を、10月初旬までに完了した。図8に鋼構造土槽骨組の製作状況を示す。1月より工場における部材製作を開始し、組み立て等作業がE-ディフェンスの屋外制作ヤードにおいてが3月中旬までに完了した。工場では振動台面に接する土槽下面の部位における完全溶け込み溶接に裏はつり溶接を用いた。現場溶接では同部位にフラックス系の裏当材を用い、いずれも研磨によって接触面を平滑化した。関連の材料試験における評価は、設計において参照した材料性能を満たしていた。UT検査の評価は検定条件を満たしていた。

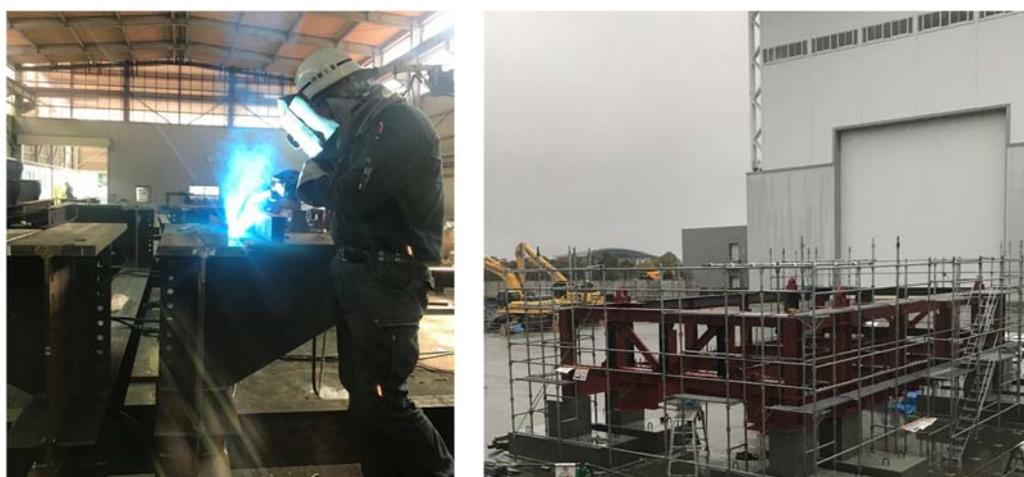


図8 鋼製土槽骨組の製作状況（工場およびE-ディフェンス屋外製作ヤード）

(c) 結論ならびに今後の課題

- ・ E-ディフェンスによる大型振動台実験の実験計画のうち、試験体設計を完了した。そして、試験体の一部を先行して製作した。個別試験によって事前評価資料を得るとともに、計測計画策定、各種センシングシステム開発についての作業を着実に進めた。平成30年度には、更に実験準備（加振計画、各種センシングシステムの開発、数値解析評価等）を前進させる必要がある。周到な工程に基づき、試験体の製作工事、計測機器設置工事等を完了し、E-ディフェンス実験を無事に完遂することに専心する。

(d) 引用文献

- 1) 長江拓也，梶原浩一，藤谷秀雄，福山國夫，川辺秀憲，大西一嘉，城戸史郎，中島正愛：家具および非構造部材に着目する高層建物の地震応答再現実験－E-ディフェンス振動台による実規模実験システム－，日本建築学会構造系論文集，628号，pp 1007-

1014, 2008

- 2) 河合直人, 槌本敬大, 大橋好光, 井上貴仁, 五十田博, 稲山正弘, 藤田香織: 木造3階建て軸組構法住宅の設計法と震動台実験 その1 全体概要, 日本建築学会大会梗概集, pp. 229-230, 2010

(e) 学会等発表実績

1) 学会等における口頭・ポスター発表

なし

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

3) マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成30年度業務計画案

- ・ E-ディフェンスによる大型振動台実験に向けて、実験準備（加振計画、各種センシングシステムの開発、数値解析評価）を推し進める。実験で用いる試験体の製作工事、計測機器設置工事を完了し、本実験を遂行する。

3.3 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備

3.3.2 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

- ・「(2)災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定」として、行政庁舎や体育館など、災害時拠点となる既設の建物内に少数のセンサを設置し、地震後速やかに建物安全性、崩壊余裕度、および継続使用の可否等を判定するシステムの構築を目指す研究開発を行う。具体的には、構造躯体のみならず設備・非構造部材をも再現した実物建物を大型振動台実験により損傷させ、センサによって検知した建物の揺れのデータをもとに、躯体から設備・非構造部材までの損傷レベルを即時に評価する技術、および崩壊余裕度の定量的評価に基づく施設の継続使用性判定手法を提案する。

(b) 平成 29 年度業務目的

- ・研究 3 年目の E-ディフェンスによる大型振動台実験に向けて、試験体の設計および設備・非構造部材を含む建物損傷評価技術の開発に着手する。更に、非構造壁の損傷挙動を把握・評価するための要素実験を実施する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	教授	楠 浩一
東京大学大学院新領域創成科学研究科	准教授	清家 剛
広島大学大学院工学研究院	准教授	日比野 陽
建築研究所構造研究グループ	主任研究員	向井 智久
大阪大学大学院工学研究科	准教授	真田 靖士
広島大学大学院工学研究院	教授	大久保 孝昭
広島大学大学院工学研究院	助教	寺本 篤史
大林組技術研究所	所長	勝俣 英雄
大林組技術研究所構造技術研究部	副部長	米澤 健次
防災科学技術研究所地震減災実験研究部門	主任研究員	中村 いずみ

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

試験体の設計、非構造部材の損傷劣化検知、および非構造部材を含む損傷評価システムの開発を目的に、以下の項目について、検討を行った。

震動台実験試験体の設計

- 1) 震動台実験試験体の試設計
- 2) 新しい壁端部ディテールを採用した袖壁付柱の性能確認実験
- 3) 新しい壁端部ディテールを採用した腰壁・垂れ壁付き梁の性能確認実験

非構造部材の損傷劣化検知

- 4) 画像解析を用いた天井の劣化診断実験
- 5) 仕上げタイルの損傷検知委実験

非構造部材を含む損傷評価システム

- 6) 構造・非構造ヘルスマニタリングシステムの統合

(b) 業務の成果

1) 震動台実験試験体の試設計

災害拠点を想定して、国土技術政策総合研究所「災害拠点建築物の設計ガイドライン(案)」技術資料「①壁を活用した鉄筋コンクリート造建築物の損傷制御設計法」を参考に、図 1-1 に示すような、1×2 スパン 3 層試験体の試設計を行った。耐震ランクは I とし、そで壁等を有効に利用した設計とした。具体的構造設計の内容を以下示す。

- ・ 雑壁（袖壁、腰壁等）を考慮したモデルで、ベースシア係数が 0.55 に達する時点の各層の最大層間変形角 R_{max} が 0.33%以内であることを確認するとともに部材塑性率が 1 以下であることを確認する。
- ・ 雑壁を無視した純ラーメンのモデルで、保有水平耐力時のベースシア係数が 0.3 以上であることを確認する。

試設計建物の地震応答解析を実施し、図 1-2 に示すように、所要の耐震性能を有していることを確認した。

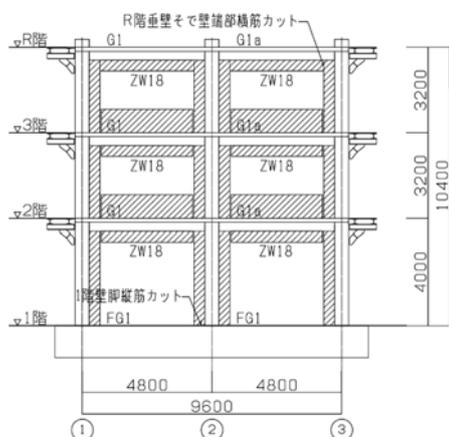


図 1-1 試験体軸組図

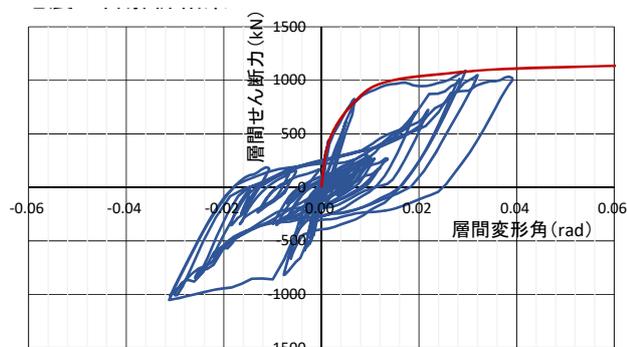


図 1-2 試験体の層せん断力一層間変形角関係

2) 新しい壁端部ディテールを採用した袖壁付柱の性能確認実験

本実験では、1)RC 柱の耐力増大を意図として柱せいと同じ長さの袖壁を有する構造の性能確認、2)袖壁の損傷抑制を意図して袖壁脚部の壁縦筋を定着しない構造詳細の効果検証を目的として、柱 1 体、袖壁付柱 2 体の 1/2 スケール試験体（写真 2-1）を対象とする構造実験を実施した。表 2-1 に 3 体の試験体概要をまとめる。

袖壁付柱 2 体は袖壁端部の拘束域の構造詳細が異なり、No.2 が保有水平耐力指針（案）によるみなし FA 相当の仕様、No.3 が ACI 規準を満足する仕様である。図 2-1 に袖壁付柱の荷重変形関係を柱と比較する。いずれの袖壁付柱も上記の設計意図通り耐力の向上が図られ、危険断面を除き袖壁の損傷を抑制できることを確認した。



写真 2-1 試験体

表 2-1 試験体概要

		No. 1	No.2	No.3	
柱	B×D	250×250 (mm)			
	主筋	10-D16($p_g=3.16\%$)			
	せん断補強筋比	D6@50($p_w=0.50\%$)			
	かぶり厚さ	25(mm)			
壁	壁筋(横筋)	—	D6@100($p_s=0.50\%$)		
	壁筋(縦筋)	—	D6@100	D10@100	
	拘束域長さ	—	130(mm)	210(mm)	
	拘束筋量	—	D10@50	□_D10@50	
	拘束域鉄筋比	X 方向	—	2.79	2.79
		Y 方向	—	1.08	1.83
	かぶり厚さ	20(mm)			
コンクリート設計基準強度		36(N/mm ²)			
鉄筋		SD345			

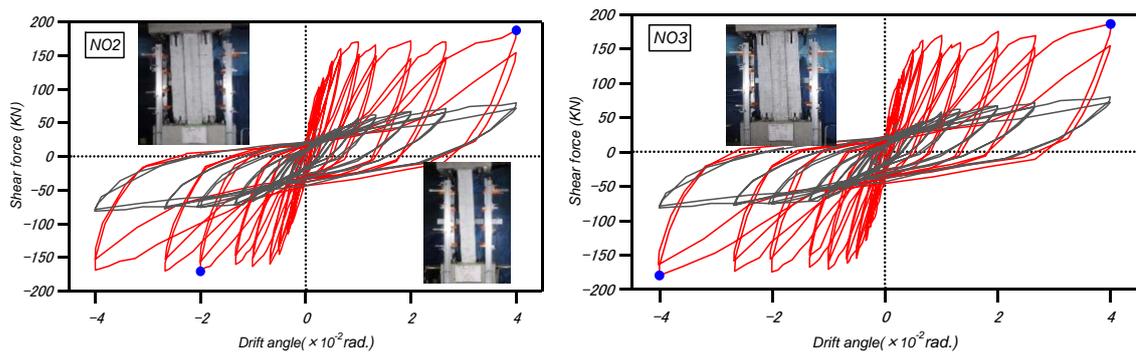


図 2-1 荷重変形関係の比較（赤線：袖壁付柱、黒線：柱）

3) 新しい壁端部ディテールを採用した腰壁・垂れ壁付き梁の性能確認実験

本実験では袖壁付き柱の実験と同様に壁端部の鉄筋を定着しない二次壁を有する梁 2 体の構造実験を行った。表 3-1 に試験体概要を、図 3-1 に試験体 BSH の配筋図を示す。試験体 BS の壁端部の拘束筋量は保有水平耐力計算基準（案）の FA 部材相当、試験体 BSH の拘束筋量は ACI 規準における壁端部拘束筋量と同等となるよう設計した。荷重—変形関係を図 3-2 に示す。試験体 BS および BSH はいずれも断面解析により計算した耐力を発揮し、良好な靱性能を有することを確認した。両試験体の構造性能において大きな差異は見られず、危険断面の浮き上がりに伴うひび割れの拡大を除き、大きな損傷が生じないことも確認した（図 3-3）。

表 3-1 試験体概要

試験体	設計基準強度 [N/mm ²]	梁部材			2次壁			せん断耐力 [kN]		
		断面 [mm]	主筋 (引張鉄筋比)	せん断補強筋 (補強筋比)	断面 [mm]	壁筋 (壁筋比)	スリット [mm]	拘束筋	断面解析	実験結果
BS	36	400×600	6-D19 (0.78%)	D13@150 (0.42%)	200×600	2-D13@150 (0.84%)	300	-	246	313
BSH								D13@75	254	285

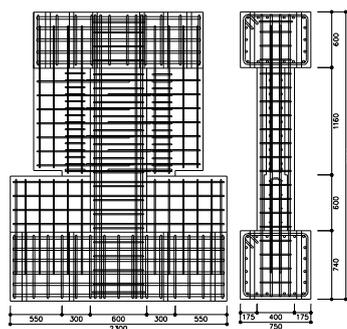


図 3-1 配筋図(BSH)

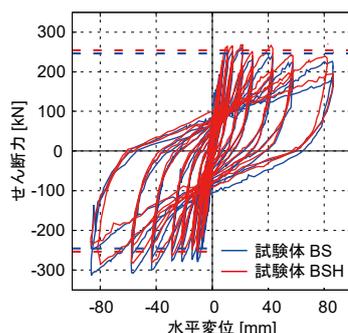


図 3-2 荷重－変形関係



図 3-3 最終破壊状況

4) 画像解析を用いた天井の劣化診断実験

地震発生時の防災拠点や避難所等の天井板の状況を確認する為、天井裏の非構造物（吊りボルト、レール、天井板）にマーカーを取付け、画像処理により各マーカーの変位を算出し、ずれ量の測定を行なった。（図 4-1、図 4-2 参照）。



図 4-1 吊りボルトへのマーカー設置イメージ
得られた結果

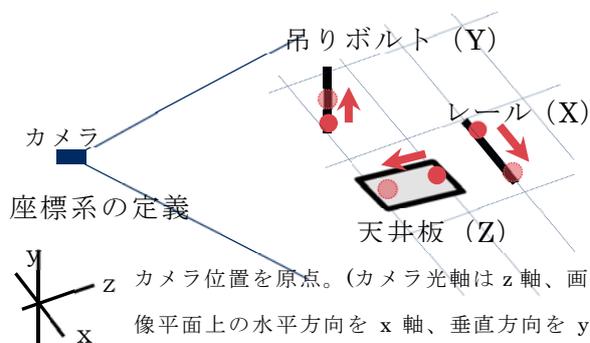


図 4-2 マーカーの設置個所と変位方向

得られた結果

- ・ 画像検知の精度のバラつきはマーカーと背景のコントラストに依存しており、コントラストが悪いと誤差が大きくなる傾向があるため、照明条件の改善が必要になる
- ・ Z 方向のずれ量は検出困難。（カメラを複数台設置して補完することが望ましい）
- ・ X, Y 軸方向はカメラから 4m 程度の距離において、5cm 程度の検出精度が得られた。

すなわち
画像処理によってマーカーのずれを検知することが可能である。

- ・画像検知の精度はマーカーの照度に依存するため、照明条件の改善が必要になる
- ・約 4m 先のマーカーの 10cm のズレを検知するためには要求されるカメラの性能は画素数 2048 x 1536 画素以上、画角 47.4×36.3 度以下である。

5) 仕上げタイルの損傷検知実験

外壁タイルと躯体との接着一体性は地震作用時に低下し、剥離、剥落を引起す場合がある。外壁タイルの剥離、剥落を検知する手法としては打音検査が一般的であるが、検査に時間を要するため、巨大地震下における被害推定、機能継続可否・機能損失度を即時に判断可能とする技術が必要である。

本実験では、RC 耐震壁を想定した壁部材に対して、接着方法、タイル寸法をパラメータとした 4 種類の工法によりタイルを貼り付け、水平載荷によって曲げひび割れ、せん断ひび割れを導入し、タイルの剥離を発生させ、載荷時に生じるタイルの剥離を、各種非破壊試験によって検知することを目的とした。実施した非破壊試験およびセンサは、打音検査、パイゲージ、光ファイバーセンサ、加速度センサ、サーモグラフィ、三次元計測であり、載荷後にタイルの実際の接着強度を取得するため、タイルの引張試験を行った。その結果、以下の知見を得た。1) 躯体のひび割れとそれに対応するタイル表層に導入されるひび割れは異なる挙動を示す。2) 剥離が発生したタイルの振動特性の変化を加速度センサにより検知することができる。3) 十分な温度変化が与えられた場合、サーモグラフィによって剥離を検知することができる。4) 光ファイバーセンサによりタイルと下地のディフレンシャルムーブメントを取得できるため、剥離が想定されるタイルに設置することで、剥離の早期検知が可能と推察される。

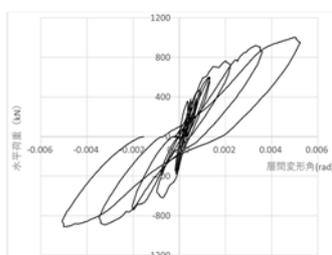


図 5-1 RC 壁の荷重変形関係



図 5-2 タイルの剥離状況 (1/200 終了後)

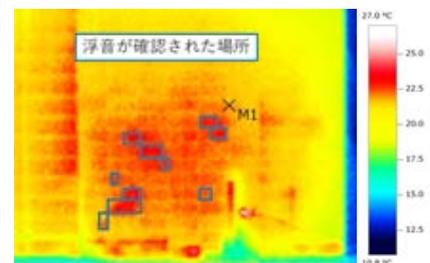


図 5-3 サーモグラフィによる剥離の検知

6) 構造・非構造ヘルスマニタリングシステムの統合

モニタリングシステムのシステム構成図を図 6-1 に示す。本システムでは、強震計の計測データから構造解析を行い建物の安全性を評価するとともに、カメラを用いた非構造部材の画像認識により継続利用性を即時評価を統合し報告することを目的としている。モニタリングシステムは、複数の強震計で地震のトリガー判定と建物の構造解析を行う構造処理サーバーと、カメラの画像データから非構造部材等の判定を行う非構造処理サーバー群から構成される。非構造処理サーバー群は、複数配置することが可能であり、判定結果も複数取り込むことが出来る。構造・非構造の各サーバーは全て固定のグローバル IP を持っており、非構造サーバーは、ローカル設置でもイン

ターネット経由での通知でも良い。結果は、非同期的に結果が判定されるため、取得出来た段階で構造処理サーバーは再度判定結果を作成することを想定している。構造処理サーバーは、非構造処理サーバー群の結果を地震毎に集約し、最終的な建物の安全性と継続使用性の判定をレポートの形で報告する。

従来システムでは、地震検出を行った時の1回のみ構造側の解析を行い、以降判定に対して情報更新されることは無かった。今回のシステムでは、以下の大きな特徴が追加されている。

1. システム的に独立した外部判断を複数取り込み、全く異なる複数の判定方法を用いて総合的な判断を行う。
2. 判定時に、全ての情報が揃ってなくても、手元にある情報（分かっている情報）を用いて可能な範囲での総合判定を行う。
3. 時間的に遅れて追加される情報がある場合には、自動的に取り込み何度でも再判定を行う。

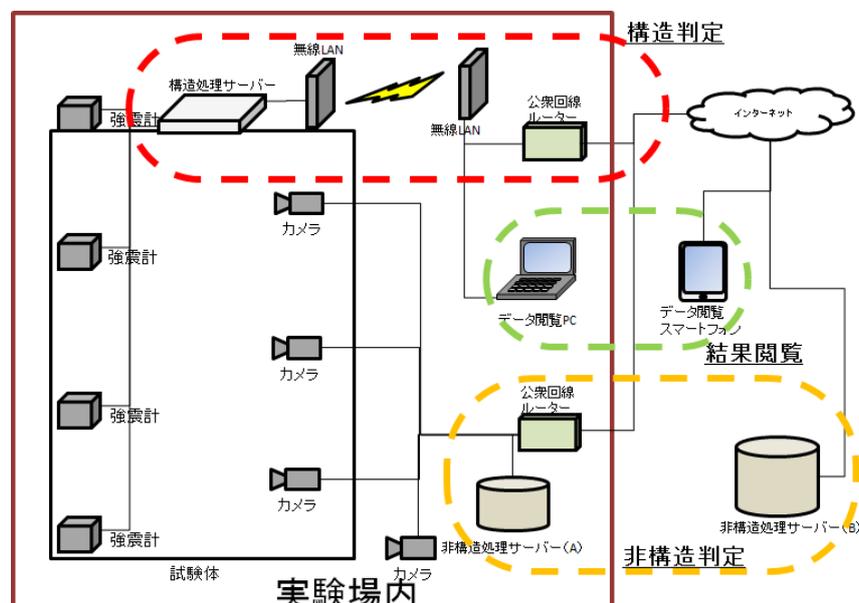


図 6-1 モニタリングシステムのシステム構成図

(c) 結論ならびに今後の課題

本年度は、試験体に用いる袖壁・腰壁・垂れ壁端部の新ディテールを用いた部材の構造性能を確認し、研究3年目に実施予定の震動台実験用の試験体（案）の設計を終えることが出来た。また、非構造部材に関しては、天井吊り材の変形を画像解析により把握する手法の基本性能、タイル仕上げの損傷劣化検知に関する基本情報を得ることが出来た。更に、構造性能評価システムと非構造性能評価システムの統合部分のシステムコード開発を行った。特に建築構造分野以外の技術利用部分も多いので、今後もプロジェクトの進捗と方向性について、密に情報共有を行う。

(d) 引用文献

なし

(e) 学会等発表実績

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所（学会等名）	発表時期	国際・国内の別
耐力向上と損傷抑制を目的とした壁縦筋を定着しない袖壁付柱部材の開発研究（その1）実験計画、口頭	椿美咲子，張政，真田靖士，楠浩一，日比野陽，向井智久	日本建築学会学術講演梗概集	2018年9月（投稿中）	国内
耐力向上と損傷抑制を目的とした壁縦筋を定着しない袖壁付柱部材の開発研究（その2）実験結果、口頭	張政，真田靖士，楠浩一，日比野陽，向井智久	日本建築学会学術講演梗概集	2018年9月（投稿中）	国内
壁筋の定着を除去した二次壁を有する鉄筋コンクリート梁部材の耐震性能評価、口頭発表	森悠吾，日比野陽，楠浩一，真田靖士，向井智久	日本建築学会大会学術講演会	2018年9月（投稿中）	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

3) マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
レジリエンス総合力向上モニタリングソフト	従来の東京大学地震研究所に設置された IT 強震計観測ネットワーク用サーバー計測ソフトの基本機能である構造ヘルスマニタリングシステムの解析レポートに様々な非構造モニタリングの判定結果を統合し，災害対策本部や避難所などの重要拠点に於ける利用可否の自動判定を行うための統合環境を構築する。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

- ・ 研究 3 年目の E-ディフェンスによる大型振動台実験に向けて、試験体の設計および設備・非構造部材を含む建物損傷評価技術の開発に着手する。更に、非構造壁の損傷挙動を把握・評価するための要素実験を実施する。

3.3 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備

3.3.3 災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

京都大学による本委託業務では、サブプロジェクト(c)のうち、「③ 災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定」として、災害時にも継続的な運用が期待される地域医療の中核病院等を対象に、地震直後にその機能損失度を定量的に評価する手法を提案し、無用な混乱を回避し安全かつ効率的な管理者の被災後運用判断を支援する仕組みに関する研究開発を行う。具体的には、高機能設備を付した病院建物に対する大型振動台実験を実施し、建物崩壊余裕度、病院機能の低下要因の特定、高機能設備個別の性能評価、施設の機能損失に関する定量的判定法を提案する。

(b) 平成 29 年度業務目的

研究 4 年目の Eーディフェンスによる大型振動台実験に向けて、試験体の設計および各種計測システムの開発に着手する。更に、病院施設の高機能設備や非構造部材の耐震度合を評価するため、個別の要素実験を実施する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
京都大学 防災研究所	准教授	倉田 真宏
防災科学技術研究所	主任研究員	河又 洋介
京都工芸繊維大学 工芸科学研究科	教授	金尾 伊織
京都大学 医学部附属病院	准教授	大鶴 繁
九州大学 人間環境学研究院	准教授	松尾 真太郎
京都大学 工学研究科	助教	藤田 皓平
京都大学 医学部附属病院	技師長	相田 伸二
京都大学 医学部附属病院	医員	堤 貴彦
京都大学 防災研究所	研究員	Konstantinos Skalomenos
京都大学 防災研究所	研究員	張 雷

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

- ・研究 4 年目の Eーディフェンスによる大型振動台実験に向けて、試験体の設計および各種計測システムの開発に着手した。
- ・病院施設の高機能設備や非構造部材の耐震度合を評価するため、個別の要素実験を実施した。

(b) 業務の成果

1) 試験体骨組の試設計

a) 建物概要と設計方針

試験体の耐震設計は、官庁施設の総合耐震・対津波計画基準の耐震安全性の分類 I 類相当として、大地震動後、構造体の補修をすることなく建築物を使用できることを目標とする。目標に応じた耐力の割り増しとして、建築基準法施行令（昭和 25 年政令第 338 号）第 82 条の 3 に規定する構造計算により安全さを確かめ、同条第二号に規定する式で計算した数値に 1.5 を乗じて得た数値を各階の必要保有水平耐力とする。部材の設計は許容応力度設計を行う。変形に対しては使用上の支障が起らないことを平 12 建告 1459 号に準じて検証する。柱梁耐力比 1.5 以上、柱・梁の部材ランクは FA ランクとする。なお、対象とする病院建物は 5 層鋼骨組と想定し試設計を実施するが、実際の実験では下部 3 層のみを製作し、上部 2 層は錘に置き換える予定である。

b) 耐震棟の設計

代表伏図、軸組図を図 1、代表断面を表 1 に示す、荷重条件を表 2 に示す。

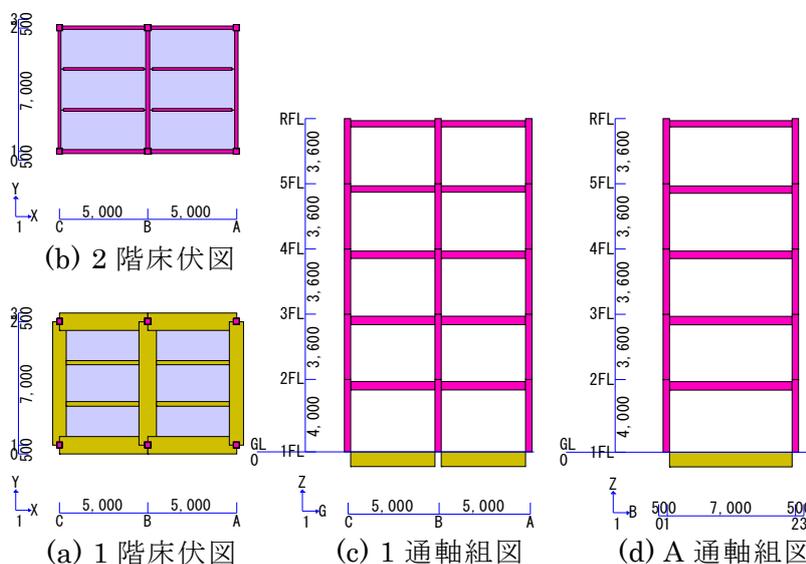


図 1 耐震建物 代表伏図、軸組図

表 1 代表断面

部位	最大断面 (mm)	鋼材種別
柱	□-350×350×16	BCP325
小梁	H-300×150×6.5×9	SS400
大梁	H-450×200×9×14	SN490
基礎梁	B1000×D800	RC 梁
スラブ	t=150	RC スラブ

表 2 荷重条件

	仕上荷重		積載荷重	
	項目	値	項目	値
病室	ビニ床シート	100	床版	1,800
	コン直押	230	小梁	1,550
	間仕切り	300	大梁	1,300
	外壁	300	地震	600
	天井・配管等	200		
	その他	200		
	合計		1,330	

c) 免震棟の設計

代表伏図、軸組図を図 2 に示す、代表断面を表 3、荷重条件を表 4 に示す。

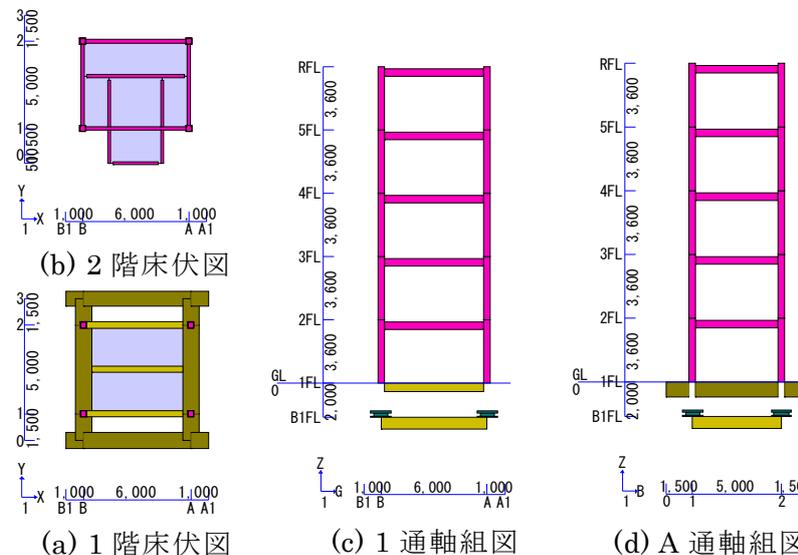


図 2 免震建物 代表伏図、軸組図

表 3 代表断面

部位	最大断面 (mm)	鋼材種別
柱	□-350×350×16	BCP325
小梁	H-350×175×7×11	SS400
跳出小梁	H-300×150×6.5×9	SS400
大梁	H-450×200×9×14	SN490
基礎梁	B900×D800	RC 梁
スラブ	t=150	RC スラブ

表 4 荷重条件

	仕上荷重		積載荷重	
	項目	値	項目	値
病室	ビニ床シート	100	床版	1,800
	コン直押	230	小梁	1,550
	間仕切り	300	大梁	1,300
	外壁	300	地震	600
	天井・配管等	200		
	その他	200		
	合計		1,330	

2) 試験体骨組の予備解析

a) 解析モデルの概要

(株)竹中工務店開発の構造設計システム BRAIN-III ver.1.7.01 を用い、立体弾塑性解析を行った。

b) 保有水平耐力の検定

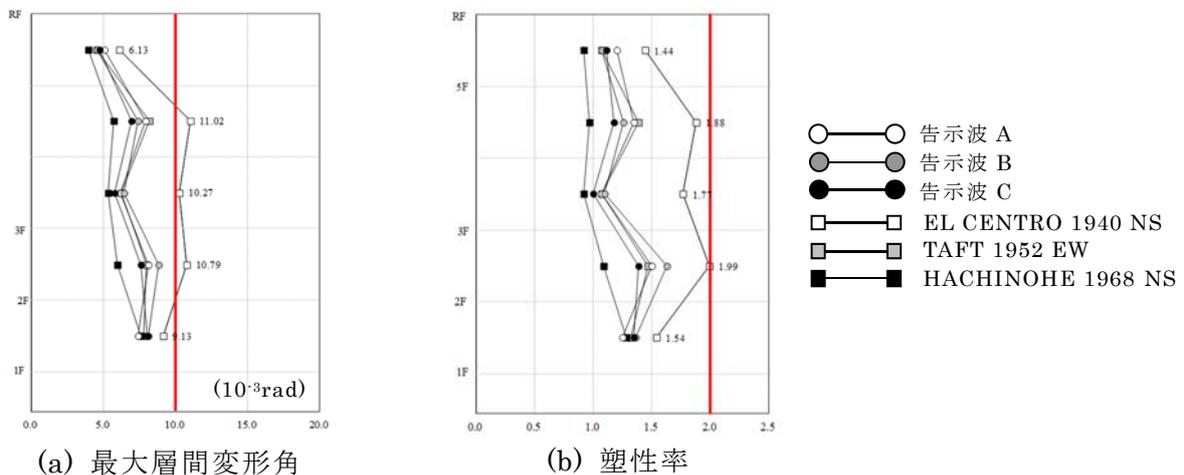
表 5 に耐震建物の保有水平耐力一覧表を示す。必要保有水平耐力の 1.5 倍以上の耐力を確保している。

表 5 耐震建物 保有水平耐力表

ケース	階	階種別	構造種別	Fe	Fs	Fes	Ds	基準保有耐力 Qd(kN)	必要保有耐力 Qun(kN)	保有耐力 Qu(kN)	Qu/Qun	判定	保有耐力決定事由 ステップ数	柱・梁パネル 耐力比	崩壊形 の判定
+X	5	一般	S造	1.0	1.0	1.0	0.25	956.1	239.0	609.2	2.55	OK	指定層間変形角 26ステップ	2.76	全体
	4							1469.9	367.5	936.7	2.55	OK		2.09	全体
	3							1897.4	474.3	1209.0	2.55	OK		1.96	全体
	2							2247.6	561.9	1432.2	2.55	OK		1.94	全体
	1							2520.1	630.0	1605.8	2.55	OK		-	全体
+Y	5	一般	S造	1.0	1.0	1.0	0.25	956.1	239.0	466.4	1.95	OK	指定層間変形角 22ステップ	2.09	全体
	4							1469.9	367.5	717.0	1.95	OK		2.4	全体
	3							1897.4	474.3	925.5	1.95	OK		2.15	全体
	2							2247.6	561.9	1096.4	1.95	OK		2.13	全体
	1							2520.1	630.0	1229.3	1.95	OK		-	全体

c) 地震応答解析結果

図 3 及び図 4 に耐震建物と免震建物のレベル 2 地震動時の最大層間変形角と塑性率をそれぞれ示す。耐震建物の最大層間変形角は 1/100 程度、塑性率は 2 程度、免震建物の最大層間変形角は 1/400 程度、塑性率は 0.9 程度である。



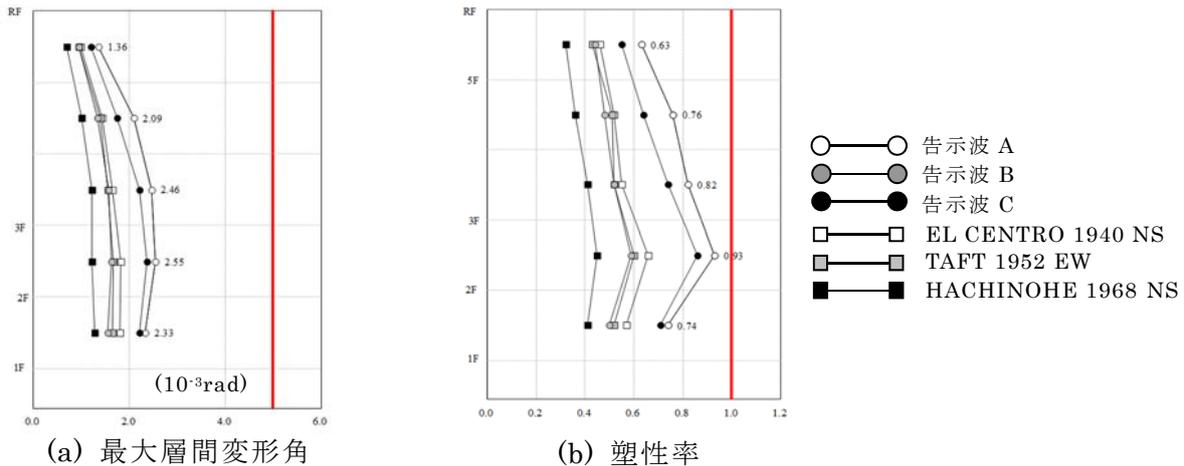


図 4 免震建物

3) Eーディフェンス実験計画

a) 試験体の詳細設計・施工計画に関連する項目のリストアップ

Eーディフェンス実験で用いる試験体は、その特異性を考慮して、詳細設計や施工計画の策定を行う。試験体の詳細設計・施工計画に際して検討が必要となる項目は、以下の通りである。今後の実験計画次第で、検討項目が追加される可能性があることに注意する。

- ・ 震動台の仕様（サイズ：20m×15m、最大重量：12MN）
- ・ Eーディフェンス保有の 900t キャリアーを用いた試験体の運搬
- ・ Eーディフェンス実験棟の 400t 天井クレーンを用いた試験体の吊り上げ
- ・ Eーディフェンス震動台への試験体の締結固定
- ・ 試験体が完全崩壊することを想定した、試験装置の損傷防止
- ・ 縮約もしくは縮小試験体を製作する場合、重量を追加するための錘の設置

b) 資機材の再利用

Eーディフェンスが保有する資機材（例：倒壊防止フレーム、錘として利用可能な鋼板、鉄骨の下部架台）や、先行して実施される課題 1 と 2 の実験で製作・購入された資機材（例：吊り治具・RC 製の下部架台）の再利用を優先的に検討する。

c) 計測および加振方針の検討

災害時重要施設の高機能設備の性能評価と機能損出判定や、構造物の応答評価や健全度判定を行うため、多数の計測機器を設置する。振動台実験や実構造物の応答計測で用いられている従来型の計測機器（例：加速度計、変位計、ひずみゲージ、ロードセル、ビデオカメラ）を主として、多種多様な計測機器の導入を検討する。要素試験や事前解析の結果を基に、合理的な計測計画を策定する。

入力地震動は、主に事前解析の結果を基に選定する。事前解析の結果に比べて、振動台実験における設備や試験体の応答・損傷程度が小さくなる可能性等を考慮し、レベルや振動数特性の異なる複数の地震動を用意する。また、選定した地震動の波形検討を行い、Eーディフェンスで再現可能かどうかの検討を行う。再現不可の場合は、追加地震動を選定する。

4) 計測システムの開発

a) モニタリングシステムの検討

重要医療施設における非構造部材を含む耐震余裕度の定量化に向けて、天井裏の設備配管等を対象としたモニタリングシステムの開発に着手した。天井裏の設備配管等は、多数の吊り材で固定されており、ケーブルラック・空調ダクト・消火/給水/排水/医療ガス等の配管系統などが混在している。モニタリング対象物が多岐にわたり、広範な範囲をカバーする必要があることからコンピュータビジョンによる画像モニタリング手法を検討した。画像データの一時保存やデータの送信、簡易なポスト処理等を行うために小型サーバを設け、暗所撮影に対応した赤外線カメラによる画像計測を計画した。図5には、後述する要素実験として共用部天井・配管の振動台実験において実際に撮影したデータの一部を示す。同図はいずれも振動台実験の期間中の夜間に撮影しており、暗所においても配管のエッジが明瞭に得られることを確認した。今後は、非構造部材の損傷として地震直後の残留変形の検出方法を検討し、画像モニタリングによるセンシング技術の開発を行う。

また京都大学医学部附属病院に MEMS 型地震計を 2 台設置し、病院内での建物振動観測に関する課題を検討した。病院内には通常電源と非常用電源があり、後者は地震時にも非常用発電施設により 3 日間程度は電源を確保できるようになっている。また院内の有線 LAN は 2 系統に分かれており、通常の通信用と個人情報が含まれる電子カルテシステム用に分かれている。地震計については、非常用電源と通常通信 LAN の使用が許された。



(a) 横菅集中部見下ろし



(b) 横菅集中部西側からの俯瞰

図5 配管等の非構造部材を対象とした画像モニタリング

5) 非構造部材・重要設備に関する検討

a) 非構造部材に関する既往の研究

建物構造躯体の被害は少なくとも、非構造部材の損傷により事業再開が困難となる事例が数多く報告されている。現在、特定天井の耐震化が進められているが、事業継続・早期再開するためには、特に、水関係のシステムの復旧に時間を要することが示されている。病院の被害調査では、スプリンクラーの破損により室内が水浸しになり、使用不可能な例が報告されている。配管設備を対象とした研究が進められているが、配管の振動特性に関しては十分に示されているとは言えない。

b) 病院施設における特殊性と地震対策における課題

病院施設は、機能継続、早期復旧が極めて不可欠な施設である。京都大学附属病院を参

考に、一般的な建物と異なる点をまとめる。

- ① 透析、ICU（集中治療室）、NICU（新生児集中治療室）、手術室などの特殊な部屋があり、天井吊の機材、特殊照明がある。可動装置が多いが、耐震対策は徹底されていない。
- ② ICU、NICU では、給排水・電気の他、医療ガスは生命線で、早期復旧が必須である。考えられる地震対策の課題を下記にまとめる。

- ① 衛生システム（給排水管、受水槽など）の破損が復旧日数に大きな影響を与えることから、衛生システムの耐震性向上が課題となる可能性がある。
- ② 天井吊の機材、可動式装置の耐震対策の検討が必要である。なお、医療ガスは柔軟性の高い銅管のため地震被害の報告はないが、今後、確認する必要がある。



図 6 医療ガス機械室の様子

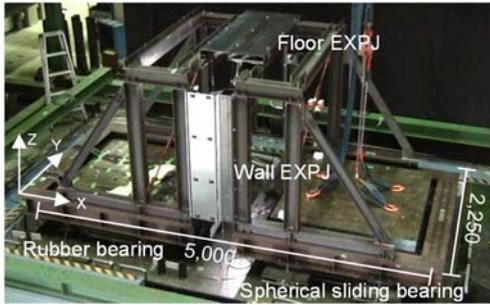
c) 病院施設における地震対策における課題

重要医療施設における重要設備として、今年度は過去の振動台実験に関する資料の収集に努めた。例えば、過去に京都大学で実施された高度管理医療機器である定置型保育器の実験では、震災時のロッキング・転倒や衝突の際には新生児に危害を及ぼす可能性が指摘されていた。保育器内部に新生児と重量が同じである、教育用の人形を実際の臨床現場と同じ方法で実験した結果では、内部のやわらかいクッションに囲まれた教育用の新生児は、全例においてうつ伏せになかったが、別の実験では、新生児がうつ伏せになるケースが報告されており、実験における医療現場の再現性が重要である。次年度以降に E-ディフェンス実験で試験体内部に設置する医療機器について、その種類や設置方法について検討を進め、医療機器別の迅速な耐震性評価や地震対策に関する提案を目標とする。

6) 要素実験

a) エクспанションジョイントの振動台実験

災害時に拠点となる大型病院では建物同士が渡り廊下によって連結されることが多く、地震や風に対する棟間の相対変位応答を許容するためにエクспанションジョイント（EXPJ）が設置されている。過去の地震では EXPJ の損傷が多数報告されているが、EXPJ を含む非構造部材の多くは機械系の部材であり、塑性化を考慮して設計される構造部材とは設計時の考え方が異なる。そこで、京都大学防災研究所の所有する振動台を用いて EXPJ の損傷メカニズムを評価した。床と壁用 EXPJ について、設計可動量まで損傷しないことを振動台実験で確認されている A ランク相当と、手動などで設計可動量まで損傷しないことが確認されている B ランク相当を対象に実験した。実験では、図 7a に示すように異なる固有周期を持つ 2 つの鋼骨組間に EXPJ を設置し、地震動と正弦波により相対変位を励起した。図 7b に損傷状態（DS）を示す。DS1 は軽微な損傷で、部品交換は必要なものの継続使用可能である。DS2 は部材交換が必要だが機能を維持する。DS3 は EXPJ としての機能を損失している。今回の実験では、DS1 と DS3 のみが観察された。それぞれの損傷状態に至った相対変位応答比（2 つの鋼骨組の相対変位を設計可動量で除したものを）を付記している。A ランクでは、設計可動量を超えても機能損失に至らなかったが、B ランク相当では、設計可動量内で軽微な損傷があり、設計可動量を超えるとすぐに機能損失に至った。



EXPJ	損傷状態 (DS)	相対変位応答比
A-床	DS1: カバープレートの離脱	193%
A-壁	DS1-A: バネの変形	109%–132%
	DS1-B: ビスの破損	116%
B-床	DS1: ビスの破損	55%
	DS3: 床の離脱	127%
B-壁	DS1: ゴムシートの離脱	擦れによる
	DS3: 壁の脱落	101%–109%

(a) 試験装置と試験体

(b) 観察された損傷状態

図7 エクスパンションジョイントの振動台実験

b) 共用部天井・配管の振動台実験

京都大学防災研究所において共用廊下を再現した振動台実験を行った。剛な骨組に長さ8mの給水管、給湯管、排水管、医療ガス管、消火管、冷媒管、空調ダクト、ケーブルラックを配置した。また中央部に3×4mの天井を配置し、天井裏配管等と天井吊り材などの干渉を観察した。入力波はJMA神戸、益城、上町とし、実大実験で建物3階に配管・天井が取り付けくことを考慮し、振動解析で得られた床応答波、原波、正弦波を与えた。主な加振履歴を表6、実験結果、実験の様子を図8に示す。

- ① 配管端部を完全拘束した状態：4階床レベルの床応答波、原波では、配管、天井の目立った損傷はなかった。試験体の振動数に合わせた正弦波では、天井のクリップが広範囲で外れたが、10g以上の加速度を計測した給湯管に損傷はなかった。
- ② 天井施工不良+配管端部の拘束を軽度にした状態：ダクトと天井の接合位置などに損傷は見られたものの、天井が脱落するような被害はなかった。
- ③ 天井施工不良+配管端部を自由にした状態：ダクトと天井の接合位置などに損傷は見られたものの、配管、天井の目立った損傷はなかった。
- ④ 天井施工不良+簡易なブレースを取り付けた旧耐震天井仕様+配管端部を自由にした状態：耐震性が期待できない簡易なブレースによって、上下振動が抑えられ、正弦波を加えても天井クリップの落下はわずかであった。簡易なブレースでも天井の損傷を軽減できる可能性を示した。

表 6 加振履歴

試験体条件	入力波	
配管端部拘束	①ランダム波(y,z 方向)	20gal
	②JMA, 益城, 上町(4FL)	10%
	③JMA4F ④益城 4FL	50,40%
	⑥JMA 原波 ⑦益城原波	50%
	⑧JMA 原波 ⑨益城原波	75%
	⑩JMA 原波	100%
	⑪築館原波	40%
天井施工不良配管端部軽拘束	⑫Sin 波 (y=8,9,z=16.5Hz)	1000gal
	①ランダム波(y,z 方向)	20gal
	②JMA, 益城, 上町(4FL)	10%
	③JMA4FL④益城 4FL	50,40%
	⑤JMA 原波⑥益城原波	50%
	⑦⑧JMA 原波	75,100%
	JMA4FL	50%
天井施工不良配管端部自由	①ランダム波(y,z 方向)	50gal
	②-④JMA 原波	50,75,100%
	⑤Sin 波 (y 方向) 1.73Hz	500,600,700,800gal
天井施工不良配管端部自由旧天井仕様	①ランダム波(y,z 方向)	50gal
	②-④JMA 原波	50,75,100%
	Sin 波 (y=10Hz)	500,800gal
	Sin 波 (y=10Hz,z=16.5Hz)	500,800,1000gal

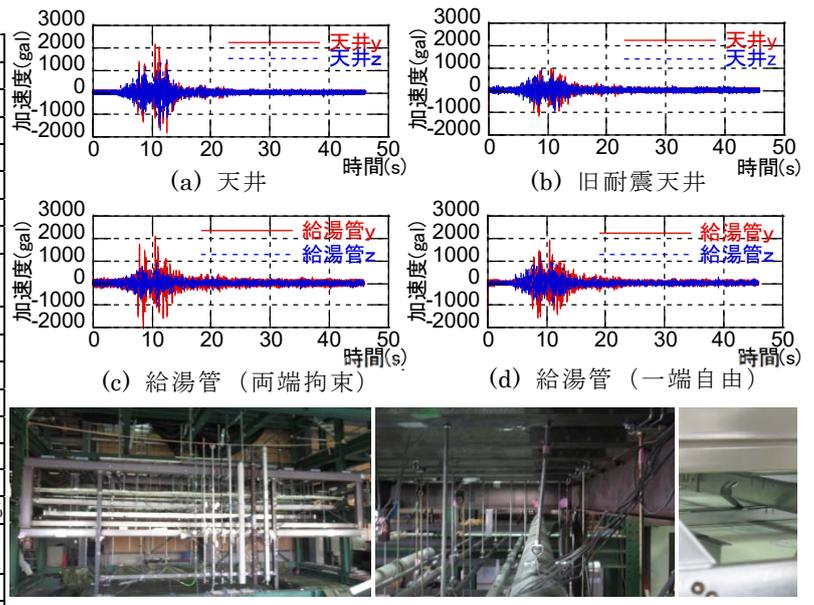


図 8 実験の様子および JMA 原波 100%入力時の天井・給湯管の加速度応答

(c) 結論ならびに今後の課題

- ・研究 4 年目の E-ディフェンスによる大型振動台実験に向けて、耐震棟と免震棟からなる試験体を試設計した。災害時に対応を求められる重要施設として、通常の建物の 1.5 倍の耐力を要件とし、数値解析により試験体の地震時応答を評価した。
- ・非構造部材の損傷評価手法の提案に向けて、主に振動計測および画像分析の手法について検討を開始した。
- ・非構造部材の耐震度合を評価するため、渡り廊下に用いられるエクспанションジョイントと共用廊下部の天井裏配管と天井の要素実験を実施し、設計レベルと設計超レベルの振動に対する損傷状態を評価した。
- ・今後は、試設計の結果をもとに細部の設計方針を固めて試験体の本設計を開始するとともに、非構造部材の損傷把握手法を引き続き検討する。また E-ディフェンスで評価対象とする医療重要設備について、医療機関や医療メーカーと連携を密にとり選定を進める。

(d) 引用文献

なし

(e) 学会等発表実績

1) 学会等における口頭・ポスター発表

なし

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

3) マスコミ等における報道・掲載

なし

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

- ・平成 29 年度に実施した試設計および予備解析結果を検証し、試験体の梁や柱などの主要部材の選定を進める。また柱梁接合部や柱脚部について、部材接合部の接合方法や詳細について検討する。その一部については、要素実験により終局性能を把握する。
- ・詳細な数値解析モデルを構築し、試験体の終局挙動を予測する。試験体骨組の地震応答解析結果に基づき、重要設備や医療機器などにかかる加速度や変位を算定する。
- ・数値解析結果に基づき、加振計画（案）および計測計画（案）を作成する。また倒壊防止フレームなど E-ディフェンス実験時の安全対策を検討する。
- ・E-ディフェンスで評価対象とする医療重要設備について、医療機関や医療メーカーと協力して、機械の種類を選定する。試験体の各部屋について、部屋の使用目的を定めて、医療機器および什器などのレイアウト（案）を作成する。
- ・試験体に設置する非構造部材・重要設備の検討においては、平成 29 年度は、病院の廊下を再現した配管・天井について予備実験を実施した。正しく施工された新しい配管は地震時に大きな損傷が無いことを確認したが、実際の地震被害では消火管などの破損が報告されていることから、老朽化した配管等の性能について文献調査および実験や解析等により検討する。
- ・天井裏や配管の損傷をモニタリングするためのシステムについて、平成 29 年度に検証したシステムに関して分析して改良を進め、E-ディフェンス実験時に適用可能なシステムの構築を進める。

3.3 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備

3.3.4 室内空間における機能維持

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

非構造部材、屋内設備、家具、什器等に関して、地震時の損傷挙動データを収集するとともに、損傷被害検証手法のガイドライン、被害対策法、地震被害センシング手法を提案する。具体的には、各種非構造部材の地震損傷が再現可能な大型振動台実験用試験体（主要構造部材は無損傷に留め、そこに取り付ける非構造部材を実験毎に取り換えることで、繰り返し使用が可能な実験ユニット）を製作し、さまざまな地震動に対して各非構造部材の損傷に関するデータを収集・蓄積する。さらに、それらのデータを整備・検討して、被害モニタリング手法の構築をめざす。

(b) 平成 29 年度業務目的

研究 5 年目に計画する Eーディフェンスによる大型振動台実験に向けて、対象とする非構造部材の選定と、試験体（繰り返し使える実験ユニット）の一部を設計・製作する。また、非構造部材の被害モニタリング手法の検討に着手する。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
防災科学技術研究所	主任研究員	佐藤 栄児
豊橋技術科学大学大学院工学研究科	助教	林 和宏

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

- ・室内空間の振動台実験に向けて、「室内空間を中心とした機能保持のための研究会」を設立し、実験研究計画の立案、非構造部材等の選定に取り組んだ。
- ・室内空間の振動台実験に向けて、試験体内部に室内空間を再現し繰り返し使用可能な試験体ユニットを設計した。
- ・室内空間における非構造部材の被害モニタリング手法提案に向けて、簡易地震計を用いた観測システムと評価対象空間の自動応答評価システムのプロトタイプを構築した。
- ・提案したプロトタイプシステムは、試験運用中実際に発生した地震に対し、2 分程度でモニタリング評価結果をメールで配信できた。

(b) 業務の成果

1) 室内空間の振動台実験に向けた検討

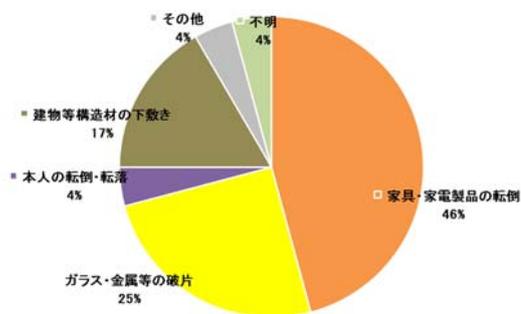
a) はじめに

本課題では、地震災害時での被害軽減をめざし、家具什器、屋内設備等を中心とし

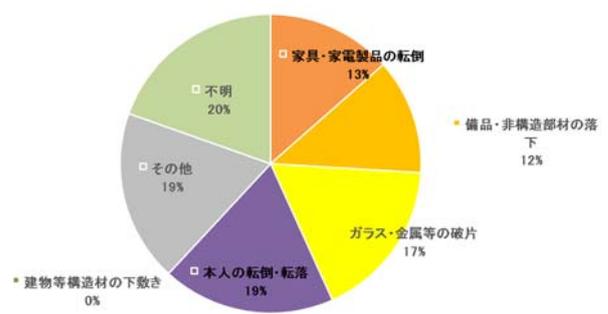
た各種非構造部材の地震被害に関する実験的検証手法の確立と、各種非構造部材の損傷挙動の把握および被害対策方法の検討などを実施し、各種知見の取得と得られた成果の展開を実施する。そのため、以下の項目を中心に研究を推進していく。

- a) 機能維持性能の検証システムの確立と標準化
- b) 機能維持に関わる判定法の科学的創出
- c) 総合的な耐震性向上・機能維持のための対策検討
- d) 人的影響・防災教育システムの検討

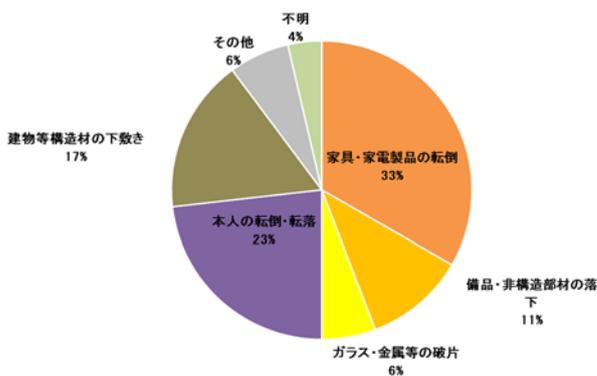
本年度は、これらの実施のため研究体制の構築、研究方針・計画の策定、実験計画の立案などを中心に実施した。また、研究に取り組むにあたって、過去のいくつかの地震災害における人的被害の要因について調査した。その結果を以下に示す。



平成 7 年兵庫県南部地震での
負傷原因 1)



平成 21 年駿河湾を震源とする
地震での受傷の原因 2)



平成 28 年熊本地震での
室内における受傷の原因 3)

図 1 人的被害の要因調査結果

これらの結果から、被害の大小はあるが人的被害の約半数の要因が、物品等を含む家具什器、非構造部材によるものであることがわかる。そのため、家具什器、非構造部材による詳細な被害評価分析および人的被害軽減方策の検討が、人的被害の軽減に大きくつながり、早期の復興復旧に大きく貢献できるものと考えられる。

b) 室内空間を中心とした機能保持のための研究会

本研究では、大地震が発生した場合、建物の室内空間を対象とした機能を継続させるため、Eーディフェンスを用いた振動実験を中心に検討を行うこととしており、対象とする機能としては、家具什器、設備機器、間仕切壁、天井等、建物の構造要素以外のものを考えている。これらの機能に対して、地震時の被災状況の把握、対策技術の検討、それらの検証方法・判定方法等の標準化、人的な感覚と類似した判定で被害の状況を把握するシステムの検討等を行い、得られた成果の社会実装を見据え研究を推進する。本研究の推進にあたり、関連機関からの協力および助言等をいただくため「室内空間を中心とした機能保持のための研究会」を設けた。2017年度での参加機関を以下に示す。

表1 室内空間を中心とした機能保持のための研究会参加機関

社名・単体名
IMV（株）
NPO 安心安全のまちづくり機構
（株）イトーキ
（株）岡村製作所
（株）桐井製作所
（株）構造計画研究所
コクヨ（株）
コマニー（株）
セコム（株）
センクシア（株）
TOA（株）
日東工業（株）
日本オフィス家具協会
ビジネス機械・情報システム産業協会
藤澤建機（株）
フリーアクセスフロア工業会
プラス（株）
防災機器検査協会
三井住友建設（株）
（株）山小電機製作所

順不同。なお、東京消防庁には、オブザーバー的に参加いただいている。

研究会は、2017年度に準備会を含め5回開催しており、うち1回はEーディフェンスの見学を行った。これは、「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト」での初めてのEーディフェンスの見学となっている。



図2 研究会開催状況

研究会では、参加機関が所有している地震時の被災情報や各機関の地震災害に対する取り組み、本実験研究への要望などについて意見交換を行っている。今後研究会での意見などを取り入れ参加機関の協力のもと研究を推進する。

c) 試験体ユニットの設計

機能維持性能の検証システムの確立と標準化の実施のため、E-ディフェンスで用いる内部に室内空間を再現し繰り返しの使用が可能な試験体ユニットの設計を行った。

本試験体ユニットでは、室内空間として床、天井、間仕切壁、家具、什器、室内設備機器等を設置し実際の居住空間（住居、オフィス、商業施設等）を再現させ、試験体ユニットごとE-ディフェンス上に搭載し、過去の観測地震動、今後想定される地震動あるいはそれらの地震動による建物の床応答波での加振実験を行い、室内空間の被害様相の把握、室内空間の安全性の検証を実施する。1つの試験体ユニットの広さは、 40m^2 ($8\times 5\text{m}$)程度とし、平面方向および上下方向に複数組み合わせることにより広い空間での評価も実施できる。

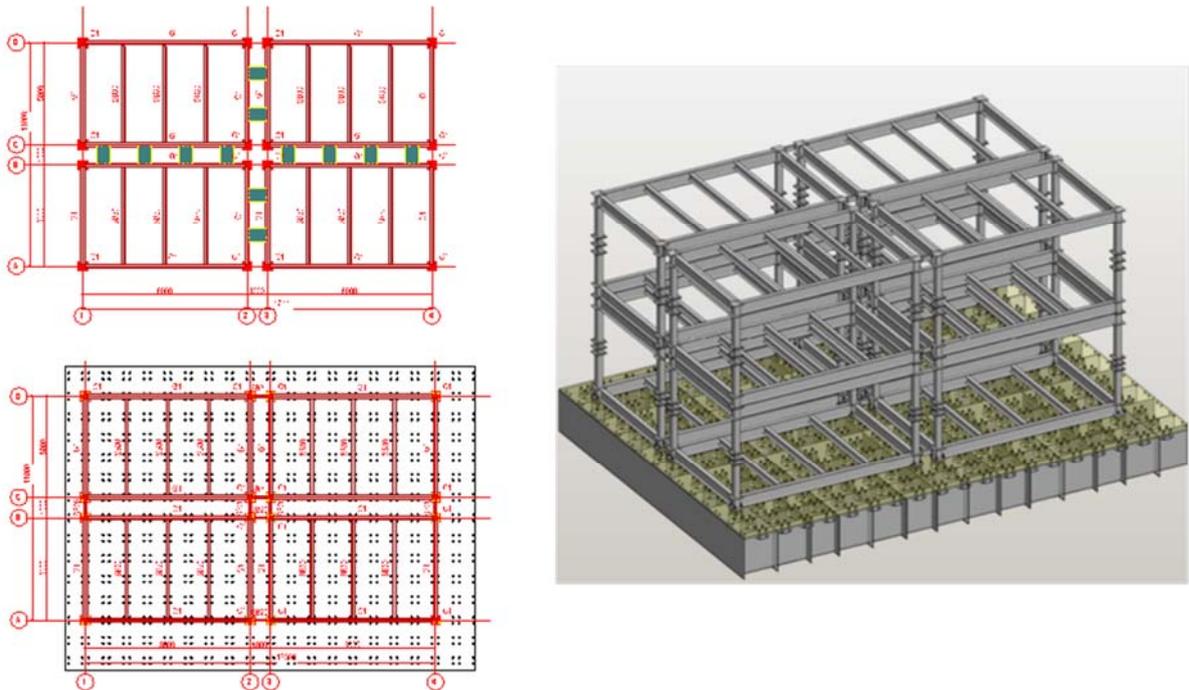


図3 試験体ユニット

2) 室内空間における非構造部材の被害モニタリング

地震時に被害を受ける室内空間の非構造部材としては、家具や什器、天井、間仕切壁やパーティションなどの非構造壁、空調等の設備機器、が考えられる。既往の研究^{4)~8)}などでは、各非構造部材に対する耐震性能評価が試みられており、その損傷を評価する指標が示されている。表2はその一例で、主として評価対象の室内空間における最大床応答加速度（一部は天井の応答加速度）、最大床応答速度、当該階の最大層間変形角が損傷評価基準として示されている。

表2 室内空間における非構造部材の被害評価指標

対象	損傷評価指標		
	加速度	速度	層間変形
家具の転倒 ⁴⁾	○	○	
天井の損傷・落下 ⁵⁾	○		
非構造壁の損傷 ^{6,7)}	○		○
空調等の設備機器の損傷 ⁸⁾	○	○	○

上記の値は、いずれも地震時の床応答加速度記録から同定することができる。本年度は、室内空間における非構造部材の被害モニタリング手法提案に向けて、建物に設置した簡易地震計による常時地震観測システムの構築と、評価対象空間における地震応答の自動評価システムプロトタイプを提案した。図4と表3に提案システムで用いた簡易地震計の概要を示す。また、図5は今回提案する被害モニタリングシステムプロトタイプ

の概要を示す。



図4 簡易地震計 ioLAM-02

表3 地震計 ioLAM-02 の概要

大きさ (mm)	95×95×72
重さ (g)	640
給電	PoE (LAN)
センサ部	MEMS
計測軸数	3 軸
計測レンジ(gal)	±2450
ノイズレベル	0.1gal 以下

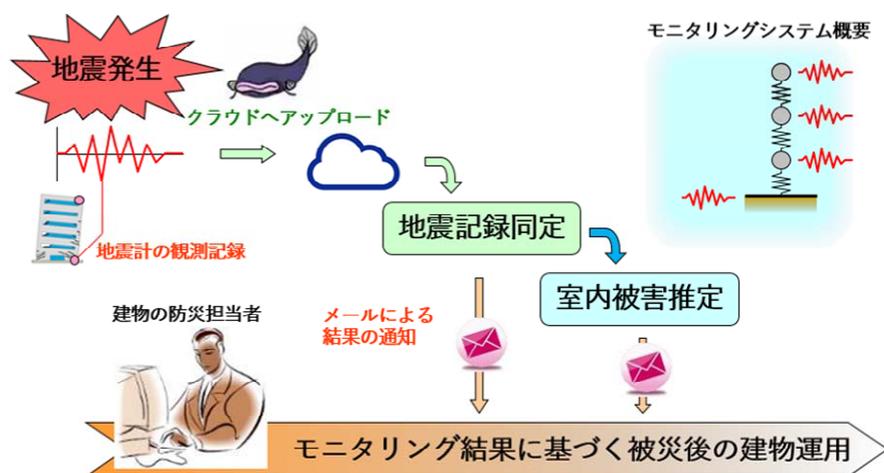


図5 提案被害モニタリングシステムプロトタイプの概要

常時地震観測システムで用いる簡易地震計は、建物の一部の階にのみ設置することとし、観測した加速度記録はリアルタイムでインターネットクラウドにアップロードされる。これを受けて、評価対象空間の地震応答自動評価システムは、加速度記録の最大値が閾値を超えているか否かで地震発生の有無を判定する。地震発生と判定された場合は、その旨を建物の防災担当者にメールで通知するとともに、対象室内空間の床応答加速度履歴、応答速度履歴、層間変形角履歴の評価に向けた地震応答シミュレーション解析を実行する。当該シミュレーション解析では、対象建物を図5中に示すような多質点系モデルに置換し、入力地震動に対する各階の応答を計算させる。その結果は、被災後の建物の運用判断に資するよう、発生した最大加速度、最大速度、層間変形角等の情報を建物防災担当者にあらためてメールで通知する。本研究では、プログラム言語として高い可搬性(多様な OS への対応)を有する Ruby と、計算速度の速い Fortran を併用した。Ruby にはインターネットクラウドへの接続やメール送信を、Fortran には地震応答シミュレーション解析を実行させる。

今年度は、提案システムプロトタイプを愛知県豊橋市内にある某公共建物 (SRC 造 15

階建て) に設置し、試験運用を行った。図 6 は、試験運用中である 2018 年 2 月 13 日 14 時 39 分に長野県南部で発生した M4.2 の地震の震度分布を示す。図のように、愛知県東部は震度 1 を観測しており、試験運用中の提案システムも地震発生との判定を下した。システムは、発生後約 2 分で地震観測を通知するメールを、その約 6 秒後にモニタリング評価結果を配信しており、概ね想定通り機能していることを確認した (図 7、8)。



差出人: [REDACTED] 宛先: [REDACTED]
 件名: [TUT_SaitoLAB] 建物の簡易診断結果 日時: Tue, 13 Feb 2018 14:41:33
 Date: 2018-02-13
 Time: 14:39
 Location: Toyohashi [REDACTED]
 East Building - Simple Diagnostic
 Maximum Acceleration: 15F - 0.986gal
 Maximum Displacement: 15F - 0.0191cm
 Maximum Story-Drift: 14F - 1/155038
 Maximum Ductility: 14F - 0.000645
 Simple Diagnostic: Safety

図 6 長野県南部地震(2018.2.13)の震度分布 図 7 試験運用結果 (モニタリング評価結果)

件名	差出人	送信日時	サイズ
[TUT_SaitoLAB] 地震波を観測しました	[REDACTED]	2018/02/13 14:41:28	306,902
[TUT_SaitoLAB] 建物の簡易診断結果	[REDACTED]	2018/02/13 14:41:33	9,336

差出人: [REDACTED] 宛先: [REDACTED]
 件名: [TUT_SaitoLAB] 地震波を観測しました 日時: Tue, 13 Feb 2018 14:41:28 +0900
 Date: 2018-02-13
 Time: 14:39
 Location: Toyohashi [REDACTED]
 Maximum acceleration: 0.813gal

図 8 提案モニタリングシステムの試験運用結果 (地震発生の通知)

(c) 結論ならびに今後の課題

2017 年度では、研究体制の構築として「室内空間を中心とした機能保持のための研究会」を設立し、研究計画の策定などを実施するとともに、2021 年度での E-ディフェンス実験のための試験体ユニットの設計を行った。また地震における人的被害の要因について過去の地震災害での被害について調査したところ、室内空間の安全性を高める必要があることを改めて認識する結果を得た。なお、地震被害の調査は今後も引き続き実施していく予定であるが、多くの場合、被害データの入手が困難であり、これらの課題解決が重要となってくる。

室内空間における非構造部材の被害モニタリング手法提案に向けて、簡易地震計を用いた観測システムと評価対象空間の自動応答評価システムのプロトタイプを構築し、試験運用を実施した。提案システムは、実際地震下で概ね想定通り機能していることを確認している。今後は、提案モニタリングシステムの評価精度の高度化を図っていくとともに、試験運用を継続することで問題点を抽出してゆく。また、提案手法を他

のセンシングデバイス（例えば、スマートフォンや感震ブレーカーなど）に移植することで、更に安価なモニタリングシステムの可能性を追求する。これは、提案システムの幅広い社会展開を考えるためである。

(d) 引用文献

- 1) 「阪神大震災による建造物の損壊と負傷に関する実態調査報告書」 阪神大震災による建造物の損壊と負傷に関する実態調査委員会
- 2) 静岡県調査結果:<http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/e-quake/shiraberu/higai/surugawanjishin/index.html>
- 3) 熊本市消防局警防部救急課（救急出動記録より）
- 4) 金子美香:地震時における家具の転倒率推定方法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.67, No.551, pp.61-68, 2002.
- 5) 金子美香, 神原浩, 小川雄一郎, 菅谷善昌: グリッド天井の耐震性能確認実験, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp.507-508, 2006.
- 6) 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト: 高層建物内の地震時安全性評価技術の開発, 平成 18 年度成果報告書, III.2-3.1, 2006.
- 7) 河村哲哉, 翠川三郎, 三浦弘之, 松田和浩, 正月俊行: 振動台実験と数値シミュレーションを用いたオフィス用パーティションの地震時挙動の把握, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.181-184, 2014.
- 8) 日本建築センター: 建築設備耐震設計・施工指針, 2014.

(e) 学会等発表実績

- 1) 学会等における口頭・ポスター発表
なし
- 2) 学会誌・雑誌等における論文掲載
なし
- 3) マスコミ等における報道・掲載
なし

(f) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

- 1) 特許出願
なし
- 2) ソフトウェア開発
なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

Eーディフェンス大型振動台実験に用いる試験体の設計・製作、実験計画の策定を継続する。また、非構造部材の被害判定法の検討を継続し、具体的な手法について提案する。そのため、「室内空間を中心とした機能保持のための研究会」の継続などを実施していく。さらに、被害モニタリング手法の提案に向けて、実験に用いるセンサの検討や、データ分析手法の提案を実施する。

3.3 非構造部材を含む構造物の崩壊余裕度に関するデータ収集・整備

3.3.5 データ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

- ・都市圏における重要施設や密集市街地の住宅群を対象として、巨大地震下における被害推定（地震による損傷レベルや危険度の同定）や機能継続可否・機能損失度・崩壊余裕度判定（事業の継続や災害対策拠点利用の可否判断）を即時に可能とする技術を開発し、速やかな災害復旧・復興に貢献する。各種の評価手法等については、広く一般に公開・普及を図り、関連機関等での利活用を促進する。

この目的にそって、早稲田大学では、「データ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討」を実施する。また、課題(1)（名古屋大学）、課題(2)（東京大学）、課題(3)（京都大学）、課題(4)（防災科研・豊橋技術科学大学）の業務統括の役割も果たす。

(b) 平成 29 年度業務目的

- ・これまでに E-ディフェンスで実施された多数の実験結果を再検証・再処理し、種々のセンサ記録の再検証や安全性評価・崩壊余裕度評価に有効なデータ処理方法を検討する。また、大都市圏の多くの高層建物にセンサが配置されたときの効率的な広域危険度判定のスキームを検証する。さらに、課題(1)～(3)の研究チームが実施する E-ディフェンス振動台実験に向けて、適切なセンシングデータ収集システムの検討、実験に適用するセンサの選定・購入・性能把握試験を行う。さらに、既設の地盤-建物系の計測データを利用して、地震応答評価精度の向上に向けた取り組みを進める。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
早稲田大学 理工学術院	教授	西谷 章
早稲田大学 理工学術院	教授	谷井 孝至
早稲田大学 理工学術院	教授	高口 洋人
足利工業大学 工学部	准教授	仁田 佳宏

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

- ・〈テーマ 1〉 これまでの E-ディフェンス実験データの整理・検証
- ・〈テーマ 2〉 地震直後の広域的な応急危険度判定システムの検討
- ・〈テーマ 3〉 今後の E-ディフェンス実験におけるセンシングシステムの検討・選定・購入・性能把握
- ・〈テーマ 4〉 既設センサによる地盤-建物系の地震観測記録の収集・整備と地震応答解析

(b) 業務の成果

〈テーマ 1〉 E-ディフェンス実験データの整理・検証

・平成 17～27 年に実施された E-ディフェンス加振実験 52 件の公開結果¹⁾について、構造種別・階数・非構造部材の有無・試験体最終状態を確認し、データ整理を行って一覧表にまとめた。これら 52 件のうち建物系の実験は 28 件ある。この 28 件の中で、加速度センサ・変位センサが各階に設置されていて、計測条件が確実に把握できる 13 件（S 造 4 体、RC 造 5 体、木造系 4 体）の実験データを抽出し、健全性の検証に向けたデータ処理手法の分析を行った。分析に用いた 13 試験体のデータが表 1 である。ここに挙げた「整理 No.」は全 52 件の通し番号である。

建物の安全度・崩壊余裕度ともっとも相関があるのは、層間変位データである。この意味では層間変位の直接計測が理想的ではあるが、現状のモニタリング実装においては、加速度センサがもっとも普及していること、さらには限定層へのセンサ設置が現実的であることを念頭において、①限定層の加速度データから全層の加速度応答を推定し、②積分計算による全層の層間変位算出を行う、という手順を想定して、加速度データからの層間変位データへの変換手法を検証した。

表 1. 分析に用いた既往の E-ディフェンス実験データ 13 試験体

整理 No.	名称	実施年 種類	構造 種別	階 数	縮尺	非構造 の有無	加速度 計	変位 計	最終状態	略称	備考
1	縮小 6 層 RC 造 耐震壁フレーム 建物の振動実験	2015 建物	RC	6	1/3	無	各階	各階	倒壊	RC 造 6 層 試験体	—
2	鉄骨造高層建物の崩壊余裕度の定量化	2014 建物	S	18	1/3	無	各階	一部の階	倒壊	S 造 18 層 試験体	—
4	長周期地震動に対する RC 造建築物の安全性検証方法に関する検討	2012 建物	RC	20	1/4	無	各階	一部の階	津島模擬波 200% 最大層間変形角 1/35	RC 造 20 層 試験体	—
5	コンクリート系建物実験/設備機器・配管実験	2010 建物	RC PC	4	1/1	無	各階	各階	神戸波 100% 鷹取波 60%	RC 造 4 層 試験体 PC 造 4 層 試験体	2 試験体
6	CLT による建築物の構造性能検証実験	2014 建物	CLT	A: 5 B: 3	1/1	無	各階	各階	一部パネルが圧縮、せん断破壊 最大層間変形角 A: 1/27 B: 1/9	CLT 造 5 層 試験体 CLT 造 3 層 試験体	2 試験体
8	地震によって損傷を受けた鉄骨建築物の耐震安全対策に関する実験研究	2013 建物	S	3	1/1	無	各階	各階	鷹取波 100% 想定南海トラフ波 150%	S 造 3 層 試験体	—
25	重要施設の機能保持性能向上耐	2010 建物	RC 耐震・	4	1/1	有	各階	各階	各種実験最大波	RC 造 4 層 耐震試験	—

	震実験		免震							体	
30	3階建て木造軸組み工法の設計法検証に関する実験	2009 建物	在来 木造	3	1/1	無	各階	各階	人工地震波 165%	木造3層 試験体	—
35	鉄骨造建物実験研究 制振構造建物実験	2009 建物	S	5	1/1	有	各階	各階	鷹取波 70%	S造5層 試験体	—
44	2階建て木造住宅(大安心の家)の耐震性能検証に関する実験重要施設の機能保持性能向上耐震実験	2008 建物	在来 木造	2	1/1	無	各階	ノイズが多く 使用不可	最大層間変 形角 1/17 耐力壁の割 れ、石膏ボ ードのはずれ	木造2層 試験体	—
46	重要施設の機能保持性能向上耐震実験重要施設の機能保持性能向上耐震実験	2007 建物	S	4	1/1	無	各階	歪型 変位計	完全崩壊	S造4層 試験体	—

- ・鉄骨造を対象とする場合には、層間変位データが直接計測されていれば（あるいは加速度データから算出されていれば）、構造情報をもとに構築した簡易なモデルによってもかなりの精度で損傷梁位置の推定が可能であることを、鉄骨 18 層建物 1/3 モデル(整理 No. 2 試験体)の層間変位データ²⁾を用いて、検証した。

〈テーマ 2〉 地震直後の広域的な危険度判定

- ・地震直後の広域的な危険度判定スキームとして、首都圏の多くの建物最上階への加速度センサ設置を前提とした判定システムを提案した。データが自動的に収集されるシステムがあれば、特別な計算を経ずに、固有周期（あるいは建物高さ情報から算定）と加速度応答最大値の組合せをプロットするだけで、地域別の（たとえば、23 区ごとの）「加速度応答スペクトル」評価を簡易的に行えること、さらにそれに基づいた応急的な広域危険度判定が可能となることを提示した³⁾。

〈テーマ 3〉 センシングシステムの検討・選定・購入・性能把握

- ・平成 30 年度から順次予定されている E-ディフェンス実験の設置するセンシングシステムを検討し、センサの選定・購入・性能把握試験を行った。現状、センシングシステム導入においては、配線関連の費用が占める割合は大きい。センサが無線化されれば配線に要する費用・設計が不要となり、今後の実装・普及を後押しすることが期待できる。この意味で、実験における無線センサの設置も積極的に検討した。

購入したセンサ、購入予定のセンサの性能把握を目的として、清水建設技術研究所の大型振動台上に「4 層せん断型建物模型」を置き、センサを設置して加振実験を行った。性能把握検証の対象としたセンサについては、基準とした「サーボ型加速度計 JA-40GA（日本航空電子）」と同等の性能が期待できることを確認した。無線センサについては、相互の時刻同期性能に関する検証も行っている。写真 1 は振動台実験の様子（平成 29 年 12 月）、写真 2 は性能

検証の対象とした無線センサの一例である。



写真1：
センサ性能検証振動台実験（写真提供：清水建設）



写真2：
ソナス無線センサ

- ・早稲田大学で開発済みの層間変位センサの改良を試みた。光源部に二種類の LED を設置して、相対傾斜角も同時に計測可能とするセンサを大学内で試作した。センサ設置位置の傾斜角データが得られると、より精度よく層間変位を計測できる。この試作品の性能検証を平成 31 年度に引続き行い、検証結果にもとづいてさらなる改良を加える。

<テーマ 4> 地盤－建物系の地震観測記録の収集・整備と地震応答解析

- ・以前よりセンサの設置されている三建物（自由学園、成蹊学園、豊洲小学校）では、地盤と建物の観測記録を継続的に収集している。これらの既設センサは、MeSO-net 地震計と文部科学省「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト」⁴⁾ で設置された地震計である。解析技術の向上を目指して、収集したデータに基づいて、地盤－建物連成系のモデル化を行った。平成 29 年度に計測されたデータをもとに、地盤－建物系の伝達関数を求め、振動特性を分析し、上部構造を多質点曲げせん断棒、基礎・地盤をスウェイロッキング(Sway-Rocking)ばねによって表した解析モデル(図1)を構築した。構築したモデルによる計算結果と実計測記録との比較を行った。

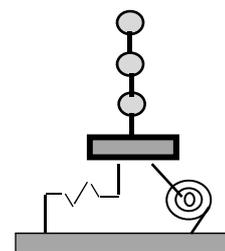


図1: 建物－地盤
連成系解析モデル

以上に加え、熊本地震の設備被害をもとに、これまでほとんど検討がなされていない地震発生時の設備被害確率予測モデルを構築した。

(c) 結論ならびに今後の課題

- ・事業計画書にあげた項目に関してはほぼ予定通り進捗している。
- ・52 件の E-ディフェンス実験を実験状況・計測状況などを比較しやすい表にまとめ、必要とするデータへのアクセスを容易にした。
- ・地域ごとに加速度応答スペクトルを簡易的に推定できれば、地震直後の、応急的、広域的危険度判定に役立てることができる。この基本的な枠組みを提示した。より具体的な枠組みのあり様と効率的なデータ収集のあり方を引き続き検討していく。

- ・今後の実験に適用予定のセンシングシステムの検討を行った。特に無線センサについては、性能検証実験により、サーボ型加速度センサと同等の性能を有することを確認し、複数センサ間の時刻同期性能についても確認した。平成 30 年度に行う E-ディフェンス実験において、現実の使用条件に近い環境のもとでの、データ取得状況、時刻同期性能を確認する予定である。
- ・実在の三建物で観測された地震時データに基づいて、地盤-建物系の解析モデルを作成した。平成 29 年度は、上部を多質点曲げせん断棒モデル、地盤・基礎を Sway-Rocking モデルとした。今後発生する地震時のデータと、モデルによる解析結果を比較して、より精度のよいモデルに修正し、地盤-建物連成モデルの精度向上を目指す。

(d) 引用文献

- 1) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：ASEBI, <https://www.edgrid.jp/>
- 2) Xiang, P., Nishitani, A., Marutani, S., Kodera, K., Hatada, T., Katamura, R., Kanekawa, K., Tanii, T.: Identification of Yield Drift Deformations and Evaluation of the Degree of Damage through the Direct Sensing of Drift Displacements, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.45(13), pp.2085-2102, 2016. (DOI:10.1002/eqe.2752)
- 3) 西谷章：データ活用による地震後の広域的な安全度・危険度判定への期待と展望（記録資料），首都圏レジリエンスプロジェクト データ利活用協議会第 3 回シンポジウム「データ利活用が目指す 3 つの先進技術」（主催：防災科学技術研究所），https://forr.cc.niigata-u.ac.jp/duc/archives/sympo_20180116/
- 4) 京都大学防災研究所：都市の脆弱性が引き起こす激甚災害軽減化プロジェクト：サブプロジェクト②都市機能の維持・回復のための調査・研究，www.toshikino.dpri.kyoto-u.ac.jp/index.html

(e) 学会等発表実績

「首都圏レジリエンスプロジェクト」発足以前の研究成果ではあるが、本プロジェクトに密接に関連する「学会誌・雑誌等における論文」「マスコミによる掲載記事」を以下に挙げる。

1) 学会等における口頭・ポスター発表

なし

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表場所 （雑誌等名）	発表時期	国際・国内の別
限られた階の加速度記録のみに基づく 3 次元スプライン補間による建物全層の応答推定	小寺健三 西谷章 沖原有里奈	日本建築学会構造系 論文集 No.746	2018 年 4 月	国内

3) マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果 (記事タイトル)	発表者氏名	発表場所 (新聞名・TV名)	発表時期	国際・ 国内の 別
地震防災スペシャル対 談：地震後のビルの健全 性を判定 構造ヘルス モニタリング	西谷 章 白石理人	読売新聞鹿児島版	2017年1月 20日	国内

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 30 年度業務計画案

- ・前年度には、これまでのEーディフェンス実験データの再検証・再処理を行い、また今後のEーディフェンス実験で用いるセンサ候補を選択し、それらを小型実験模型に設置して性能検証の確認等を行ってきた。本年度は、課題(1)のチームと連携しながら、木造建物実験におけるセンサ配置計画を策定する。また、層間変位センサの設置に必要な、実験建物模型の寸法にあわせたキャリブレーションを実施する。Eーディフェンス実験において、種々のデータ計測を行うが、特に、無線センサの性能に焦点をあてる。加えて、前年度に東京の多くの高層建物群にセンサが配置されたときの広域危険度判定のスキームとして、簡易な「応答スペクトル」を提案したが、センシングデータの迅速な収集システムの検討も含めて、より具体的なあり様を検討する。ひきつづき、サブプロジェクト(b)等との連携により、サブプロジェクト(b)が収集する既設の常時地震観測記録を断続的に利用し、地盤-建物系の地震応答評価精度の向上に向けた取り組みを進める。

4. 活動報告

4.1 サブプロジェクト (c) 運営委員会議事録

(1) 第1回(平成29年度第1回)

1. 日時 平成29年7月25日(火)10時00分～13時00分
2. 場所 早稲田大学 西早稲田キャンパス 55号館 N棟 2階 建築学科大会議室
3. 議題
 - (1) 事業概要説明会議事録確認
 - (2) 今年度の業務計画
 - (3) 各課題研究会報告(今年度研究計画等)
 - (4) サブプロ(C)のチラシ
 - (5) 研究成果の社会還元方策その他(今後の日程等)
4. 配付資料
 - 1-1 事業概要説明会議事録(案)
 - 1-2 平成29年度業務計画書
 - 1-3 研究会審議内容
 - 1-3-1 ① 簡易・広域センシングを用いた広域被害推定・危険度判定
 - 1-3-2 ② 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定
 - 1-3-3 ③ 災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定
 - 1-3-4 ④ 室内空間における機能維持
 - 1-3-5 ⑤ データ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討
 - 1-4 サブプロ(C)チラシ(案)
 - 1-5 委員名簿および会議開催予定

5. 出席者

	氏名	所属
研究統括	西谷 章	早稲田大学 理工学術院
研究統括	梶原 浩一	(国) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
委員	長江 拓也	国立大学法人名古屋大学 減災連携研究センター
委員	楠 浩一	国立大学法人東京大学 地震研究所
委員	倉田 真宏	国立大学法人京都大学 防災研究所
委員	佐藤 栄児	(国) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
委員(事務局)	林 和宏	国立大学法人豊橋技術科学大学大学院 工学研究科

6. 議事概要

- ・ 事業概要説明会議事録(案)を確認した。
- ・ 平成29年度業務計画書により本年度の業務を確認した。
- ・ 課題①における簡易・広域センシングを用いた広域被害推定・危険度判定について説明があり、議論した。
- ・ 課題②における災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判

定について説明があり、議論した。

- ・ 課題③における災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定について説明があり、議論した。
- ・ 課題④における室内空間における機能維持について説明があり、議論した。
- ・ 課題⑤におけるデータ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討について説明があり、議論した。
- ・ サブプロジェクト(C)のチラシ(案)が事務局より提示された。
- ・ 委員名簿および今年度の運営委員会の開催日時を確認した。

第 02 回 (平成 29 年度 第 2 回) = 12/15 (金) 13:00~16:00

第 03 回 (平成 29 年度 第 3 回) = 2/16 (金) 16:00~19:00

(2) 第 2 回 (平成 29 年度 第 2 回)

1. 日 時 平成 29 年 12 月 15 日 (金) 13 時 00 分 ~ 16 時 00 分
2. 場 所 早稲田大学 西早稲田キャンパス 55 号館 S 棟 6 階 首都圏レジリエンス PJ 会議室
3. 議 題
 - (1) 前回議事録確認
 - (2) 各課題研究会報告(今年度の研究進行状況、日米共同研究等)
 - (3) 首都圏レジリエンスプロジェクト全体の状況
 - (4) その他(今後の日程等)
4. 配付資料
 - 2-1 前回議事録(案)
 - 2-2 研究会審議内容
 - 2-2-1 ① 簡易・広域センシングを用いた広域被害推定・危険度判定
 - 2-2-2 ② 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定
 - 2-2-3 ③ 災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定
 - 2-2-4 ④ 室内空間における機能維持
 - 2-2-5 ⑤ データ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討
 - 2-3 首都圏レジリエンスプロジェクト全体の状況と今後の予定について

5. 出席者

	氏 名	所 属
研究統括	西谷 章	早稲田大学 理工学術院
研究統括	梶原 浩一	(国) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
委員	長江 拓也	国立大学法人名古屋大学 減災連携研究センター
委員	楠 浩一	国立大学法人東京大学 地震研究所
委員	佐藤 栄児	(国) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
委員	河又 洋介	(国) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
委員(事務局)	林 和宏	国立大学法人豊橋技術科学大学大学院 工学研究科

6. 議事概要

- ・ 前回議事録(案)を確認した。
- ・ 課題①における簡易・広域センシングを用いた広域被害推定・危険度判定について説明があり、議論した。
- ・ 課題②における災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定について説明があり、議論した。
- ・ 課題③における災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定について説明があり、議論した。
- ・ 課題④における室内空間における機能維持について説明があり、議論した。
- ・ 課題⑤におけるデータ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討について説明があり、議論した。
- ・ 首都圏レジリエンスプロジェクト全体の状況と今後の予定が事務局より提示された。
- ・ 今年度の運営委員会の開催日時を確認した。

第 03 回 (平成 29 年度 第 3 回) = 2/27 (火) 15:00~18:00

(3) 第 3 回 (平成 29 年度 第 3 回)

1. 日 時 平成 30 年 2 月 27 日 (金) 15 時 00 分 ~ 18 時 00 分
2. 場 所 早稲田大学 西早稲田キャンパス 55 号館 S 棟 6 階 首都圏レジリエンス PJ 会議室
3. 議 題
 - (1) 前回議事録確認
 - (2) 各課題研究会報告(今年度の研究進行状況と次年度の研究計画等)
 - (3) その他(建築学会大会投稿、次年度の日程等)
4. 配付資料
 - 3-1 前回議事録(案)
 - 3-2 研究会審議内容
 - 3-2-1 ⑤ データ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討
 - 3-2-2 ① 簡易・広域センシングを用いた広域被害推定・危険度判定
 - 3-2-3 ② 災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定
 - 3-2-4 ④ 室内空間における機能維持
 - 3-3 学会投稿論文について

5. 出席者

	氏 名	所 属
研究統括	西谷 章	早稲田大学 理工学術院
研究統括	梶原 浩一	(国) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
委員	長江 拓也	国立大学法人名古屋大学 減災連携研究センター
委員	楠 浩一	国立大学法人東京大学 地震研究所

委員	井上 貴仁	(国) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
委員	佐藤 栄児	(国) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
委員	中村 いずみ	(国) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
委員	河又 洋介	(国) 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター
オブザーバー	渋谷 昌彦	文部科学省研究開発局 地震・防災研究課防災科学技術推進室
オブザーバー	金子 雅彦	文部科学省研究開発局 地震・防災研究課防災科学技術推進室
オブザーバー	平田 容章	(国) 防災科学技術研究所 首都圏レジリエンス研究センター
オブザーバー	松戸 勉	(国) 防災科学技術研究所 首都圏レジリエンス研究センター
委員(事務局)	林 和宏	国立大学法人豊橋技術科学大学大学院 工学研究科

6. 議事概要

- ・ 前回議事録(案)を確認した。
- ・ 課題⑤におけるデータ収集・整備と被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用検討について説明があり、議論した。
- ・ 課題①における簡易・広域センシングを用いた広域被害推定・危険度判定について説明があり、議論した。
- ・ 課題②における災害拠点建物の安全度即時評価および継続使用性即時判定について説明があり、議論した。
- ・ 課題③における災害時重要施設の高機能設備性能評価と機能損失判定について説明があり、議論した。
- ・ 課題④における室内空間における機能維持について説明があり、議論した。
- ・ 学会投稿論文・梗概に関して、謝辞記載例を周知した。
- ・ E-ディフェンス実験実施にあたり、計測データの公開方針を周知確認した。
- ・ 次年度の運営委員会開催方針を確認した。開催は年3回(5月末～6月上旬、9月下旬、2月下旬)とし、候補日を出欠アンケートにより確定することとした。

4.2 対外発表

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所 （学会等名）	発表時期	国際・国内の別
耐力向上と損傷抑制を目的とした壁縦筋を定着しない袖壁付柱部材の開発研究（その1）実験計画、口頭	椿美咲子，張政，真田靖士，楠浩一，日比野陽，向井智久	日本建築学会学術講演梗概集	2018年9月 （投稿中）	国内
耐力向上と損傷抑制を目的とした壁縦筋を定着しない袖壁付柱部材の開発研究（その2）実験結果、口頭	張政，真田靖士，楠浩一，日比野陽，向井智久	日本建築学会学術講演梗概集	2018年9月 （投稿中）	国内
壁筋の定着を除去した二次壁を有する鉄筋コンクリート梁部材の耐震性能評価，口頭発表	森悠吾，日比野陽，楠浩一，真田靖士，向井智久	日本建築学会大会学術講演会	2018年9月 （投稿中）	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表場所 （雑誌等名）	発表時期	国際・国内の別
限られた階の加速度記録のみに基づく3次元スプライン補間による建物全層の応答推定	小寺健三 西谷章	日本建築学会構造系論文集 No.746	2018年4月	国内

3) マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果 （記事タイトル）	発表者氏名	発表場所 （新聞名・TV名）	発表時期	国際・国内の別
地震防災スペシャル対談：地震後のビルの健全性を判定 構造ヘルスマニタリング	西谷章 白石理人	読売新聞鹿児島版	2017年1月 20日	国内

5. むすび

サブプログラム(c)の研究は、課題(1)～(5)ともに、平成30年度以降に順次実施予定の、実物建物を模擬した試験体のEーディフェンス震動台実験に向けた準備業務となる。

課題(1)(2)(3)(4)の実験は、それぞれ平成30年度、31年度、32年度、33年度となるので、課題ごとに、実験対象とする建物モデルの設計状況、実験に対する準備状況は異なる。

各課題の成果は、次のようになる。

Eーディフェンス実験が30年度となる課題(1)では、試験体設計を完了した。住宅密集地の木造建物を想定して、地盤・基礎までの含む試験体による実験を想定している。実験が差し迫っていることもあり、加振・計測計画策定、各種センシングシステムの開発など具体的な実験計画を立案した。また、先行して製作した試験体の一部を用いた個別要素実験により、性能把握を目的とした事前評価も行っている。これらの結果は、引き続き行う30年度の実験準備につながっていく。

課題(2)では、防災拠点となりうる鉄筋コンクリート構造の役所を想定した実験を31年度に行う。非構造部材の損傷劣化検知、および非構造部材を含む損傷評価システムの開発を目的に、以下に挙げる検討を行った。

実験対象とする試験体の試設計を行うとともに、<新しい壁端部ディテールを採用した袖壁付柱>および<新しい壁端部ディテールを採用した腰壁・垂れ壁付き梁>の性能確認実験を実施した。非構造部材の損傷劣化検知に向けては、画像解析を用いた天井の劣化診断実験、仕上げタイルの損傷検知実験を行った。非構造部材を含む総合的な損傷評価システムの構築に向けた、構造・非構造ヘルスマニタリングシステムの統合の検討も行っている。

課題(3)では、鉄骨造の病院を想定した実験を32年度に行う。耐震棟と免震棟を渡り廊下でつなぐ病院を想定して試験体を試設計した。災害時の重要施設となるので、通常建物の1.5倍の耐力をもたせるべく、試験体の地震時応答解析を行った。また、非構造部材の損傷評価手法の提案に向けて、画像分析の手法についても検討を開始している。

本実験前の準備として、病院施設の高機能設備や非構造部材の耐震度を評価するため、渡り廊下に用いられるエクспанションジョイントと共用廊下部の天井裏配管と天井の要素実験を実施した。この結果を受けて、30年度には、細部の設計方針を固めて本設計を開始する。

課題(4)では、非構造部材を主対象とした室内空間被害に関する実験を33年度に行う。家具什器、屋内設備等を中心とした各種非構造部材の地震被害に関する実験的検証手法の確立、各種非構造部材の損傷挙動の把握および被害対策方法の検討、室内空間における非構造部材の被害モニタリング手法提案を目的に、以下に挙げる検討を行った。

室内空間の振動台実験に向けて、家具什器、屋内設備等を扱う企業の方々の参加による「室内空間を中心とした機能保持のための研究会」を設立した。当該研究会では、実験計画の立案や対象非構造部材の選定、室内空間を再現した試験体ユニットの設計を行った。更に、室内空間における非構造部材の被害モニタリング手法提案に向けて、簡易地震計を用いた観測システムと評価対象空間の自動応答評価システムのプロトタイプを構築した。

課題(5)は、上記の各課題の統括の役割も担いながら、今後のEーディフェンス実験に共通して設置するセンシングシステムの検討・選定・購入・性能把握を行った。また、これまでに行われた過去のEーディフェンス実験データの整理を行って、健全性判定に至るプロセスの検証を行った。さらに、地震直後の、応急的、広域的危険度判定のための基本的な枠組みを提案した。地盤ー建物連成モデルの精度向上を目指して、実在の三建物に設置されている地震計データに基づいて、地盤ー建物系の解析モデルを作成した。

平成30年度以降も、各課題は連携をとりながら、適切に実験を進めていく。

サブプロジェクト(C) 研究統括 西谷章、梶原浩一