

目次

本事業の概要、および、平成 28 年度成果報告書について

平成 28 年度・研究成果報告

テーマ 1 「大都市中心エリアを対象としたオールハザード対応キットの開発」

- 1-1 大都市中心エリアを対象としたオールハザード対応キットの開発
村上正浩・境野健太郎・藤賀雅人 1
- 1-2 VR、動画像解析、視線計測を利用した都市災害時の対応モデル、訓練ツールの開発
福田一帆・小西克己 3
- 1-3 建築分野における AR・VR 技術の基礎的研究
石田航星 5

テーマ 2 「機能継続・早期復旧を可能とする大地震対策建築モデルの開発」

- 2-1 機能継続・早期復旧を可能とする大地震対策建築モデルの開発
山下哲郎・田村雅紀・久田嘉章・西川豊宏 7
- 2-2 レジリエンスな社会構築のための地震動評価と建築の被害低減策
久田嘉章 17
- 2-3 機能継続・早期復旧を可能とする大地震対策建築モデルの開発
～設備施設の耐震性能向上～
西川豊宏 25
- 2-4 超高層ビルの構造・非構造部材における要素材料の長期耐用性に関する研究
～築 27 年経過した PC 板シーリング材の劣化度と損傷リスク評価～
小野航太郎・田村雅紀・阿部道彦・岡 健太郎 29
- 2-5 超高層ビルの構造・非構造部材における要素材料の長期耐用性に関する研究
～外壁タイルの浮き状況調査と剥落時損害リスクの算定～
尾林 岳・田村雅紀・岡 健太郎 33
- 2-6 既存建物の非構造・天井部材における補修モデルに関する研究
～木摺り漆喰天井部材の補修工法～
岡 健太郎・田村雅紀・後藤 治 37
- 2-7 超高層ビルの構造・非構造部材における要素材料の補修モデルに関する研究
～アクティブ赤外線サーモグラフィ装置を用いたコンクリートのひび割れ深さ検出～
佐藤勇太・田村雅紀・岡 健太郎 43

テーマ 3 「エリア防災拠点をつなぐ自立移動式災害対応支援ユニットの開発」

- 3-1 エリア防災拠点をつなぐ自立移動式災害対応支援ユニットの開発
中島裕輔 47
- 3-2 自立移動式ゼロエネルギー災害対応支援ユニット(D-ZEV)のための通信システムの
基本検討
水野 修 49
- 3-3 太陽熱集熱器モデルの整備
富樫英介・横山計二 51
- 3-4 自立移動式ゼロエネルギーユニットにおける電源供給システムの研究
野呂康宏 53

資料 平成 28 年度・研究業績

- テーマ 1 村上正浩・境野健太郎・藤賀雅人（建築学部）
福田一帆・小西克己（情報学部） 55
- テーマ 2 山下哲郎・田村雅紀・久田嘉章・西川豊宏（建築学部） 57
- テーマ 3 中島裕輔・富樫英介・横山計二（建築学部）
水野 修（情報学部）、野呂康宏（工学部） 59

平成 28 年度 文部科学省 私立大学研究ブランディング事業
事業名「巨大都市・複合災害に対する建築・情報学融合による
エリア防災活動支援技術の開発と社会実装」

本事業の概要、および、平成 28 年度成果報告書について

はじめに

本報告書は、工学院大学総合研究所・都市減災研究センター（Research Center for Urban Disaster Mitigation；略称 UDM）により、平成 28 年度 11 月より 5 年計画で開始した文部科学省私立大学研究ブランディング事業「巨大都市・複合災害に対する建築・情報学融合によるエリア防災活動支援技術の開発と社会実装」の平成 28 年度の成果報告書である。以下に本事業の概要を紹介する。

研究の背景

膨大で人口が集中する超高層建築や広大な地下街等を有する東京・新宿に代表される巨大都市の中心市街地とその周辺の住宅地（以下、大都市中心エリア）では、首都直下地震などの震災だけでなく、近年の異常気象に起因した集中豪雨による水害など都市型複合災害（オールハザード）への対策が焦眉の課題となっていることである。大都市中心エリアは、膨大な人口により災害時のスペースが絶対的に不足しており、被災し難く、仮に被災しても速やかに復旧可能な「逃げる必要のない建築・まち」の実現が強く望まれている。

工学院大学におけるこれまでの取り組み

工学院大学は、これまで巨大都市の災害低減のための研究・教育・社会貢献活動を主要なブランディング事業と位置づけ、様々な取り組みにより多くの実績をあげている。例えば、2001 年に地震防災・環境研究センター、2009 年には都市減災研究センター（UDM）を開設し、都市の建築・地域・エリアの防災・減災に関する先端的な研究開発を実施している。さらに 2009 年には TKK 助け合い連携センターを開設し、防災・減災・ボランティア活動をテーマとした活発な社会貢献教育も展開している。一方、2011 年には全国初となる建築学部を新設し、安全安心な建築・まちを実現するための実践的な研究・教育を推進しており、さらには 2016 年には情報学部が開設し最先端の ICT 技術の研究・教育を実践している。

本学の災害低減研究の実践の場として、世界最大の乗降客数を誇る新宿駅周辺地域やその周辺の住宅地では、地元行政（新宿区）と住民・事業者との密接な連携により、講習会や地域防災訓練などの多様な防災・減災活動を行っている。その成果は地元企業の BCP や施設の消防・防災計画等に反映されるだけでなく、新宿区の地区防災計画など震災対策の推進や、都市再生安全確保計画制度の創設と新宿駅周辺地域での実施事例（首相官邸、2014）、「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告（内閣府、2015）」など、広く自治体・国の施策にも反映されている。これらの業績により、本学、および、連携している新宿駅周辺防災対策協議会は「ジャパンレジリエンスアワード（強靱化大賞）2015」にて最優秀レジリエンス賞を受賞するなど高い評価を頂いている。

本事業の目的

図1に示すように主として建築学分野で得られた震災対策の成果と、情報学部が保有する最先端のICT技術（AR/VR、モニタリング/画像処理、非常通信/高速情報処理など）との融合により、震災・水害等による都市型複合災害に強く、速やかな機能回復による「逃げる必要のない建築・まち」の実現を支援するエリア防災活動支援技術の研究開発事業と、その成果をもとにした地域連携による社会実装事業を行うことである。まず、研究開発事業は、マルチハザード認識・エリア防災計画策定・オールハザード対応訓練のツール群で構成する「①オールハザード対応キット」、都市型拠点建築を対象に機能継続・早期復旧を可能とする「②大地震対策建築モデル」、および、エリア拠

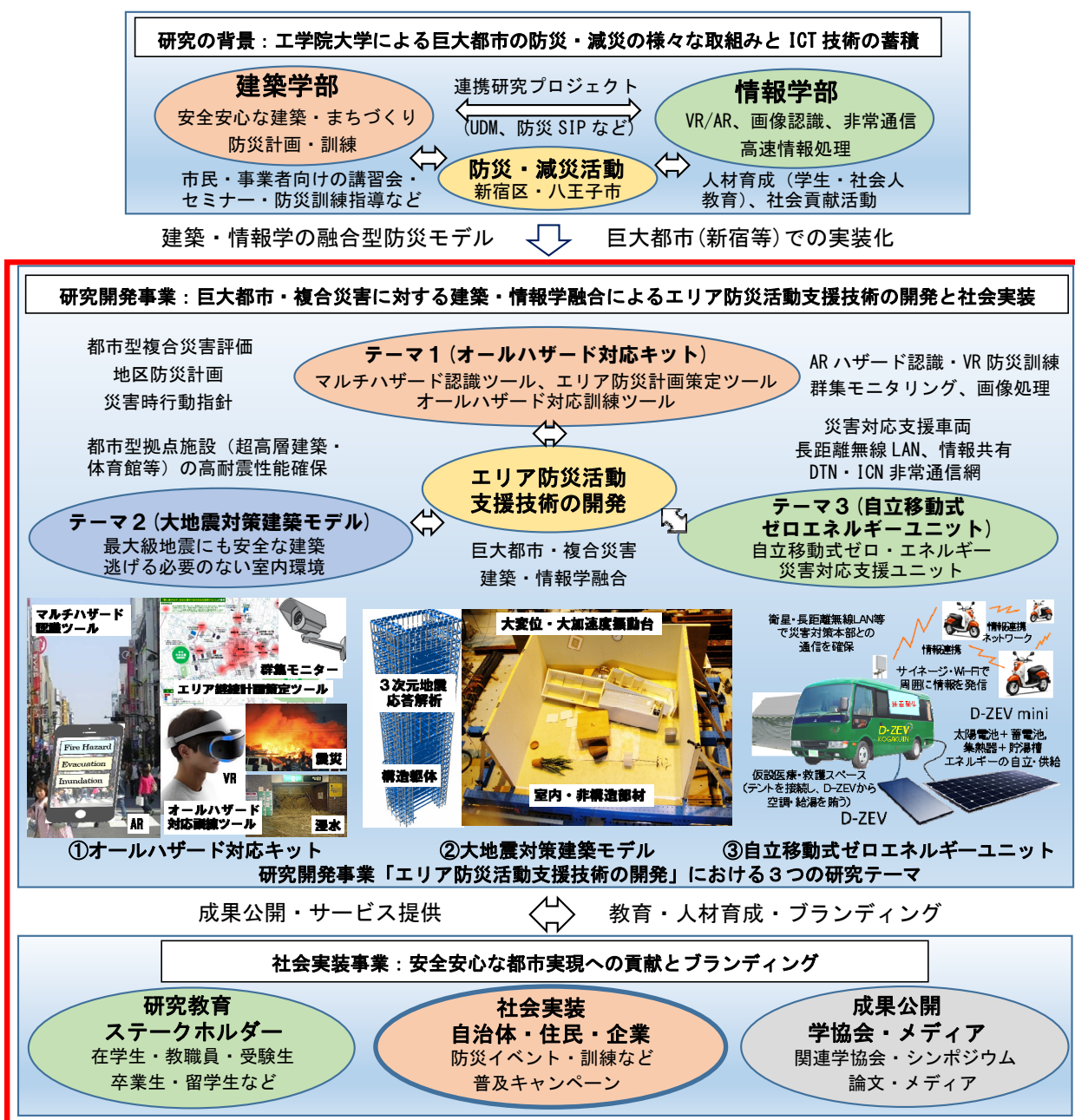


図1 本事業のイメージ図

点施設において災害対応支援を行う「③自立移動式ゼロエネルギーユニット」、による3つの研究開発で構成する。一方、並行して実施する社会実装化事業では、地元の自治体（新宿区等）と住民・事業者との連携により、3つの開発技術を様々なイベント（講習会・防災訓練・防災イベントなど）で実際に適用し、その有効性を検証したうえで、全ての成果を広報するキャンペーン（チラシ・サイネージ・メディア広報など）等によるブランディング事業を実施する。

本事業の計画の概要

本学が保有する最先端の建築学と情報学の最新技術を融合させ、図1に示す3つの研究テーマである、①オールハザード対応キット、②大地震対策建築モデル、および、③自立移動式災害対応支援ユニット、で構成するエリア防災活動支援技術の研究開発事業と、地元行政（新宿区）と住民・事業者と連携した成果の普及キャンペーン等の実施による社会実装事業を行う。

研究開発事業による期待される研究成果と、その測定・検証法は以下の通りである。

研究テーマ1「大都市中心エリアを対象としたオールハザード対応キットの開発」

大都市中心エリアを構成する住民・事業者（自助の担い手）とエリア（共助の担い手）を対象として、都市型複合災害を対象とした防災計画の策定から訓練実施のための標準化ツールであるオールハザード対応キットを開発する。具体的には、①AR（拡張空間）技術を活用した街中で震災・水害等による都市型複合災害を体験できるマルチハザード認識ツール、②各種モニタリング（監視映像による群集動態モニタリングなど）技術を活用した事前の災害対応計画・行動ルールの策定の手引書となるエリア防災計画策定ツール（研究テーマ2と連携）、及び、③3次元空間モデリングとVR（仮想現実）技術を活用した都市型複合災害の訓練セットであるオールハザード対応訓練ツール（研究テーマ3と連携）、を開発する。各年度に連携自治体・住民・事業者を対象とした防災イベント・地域防災訓練等で開発ツール類を使用し、アンケート・ヒアリング調査による有効性を検証のうえ、実施・適用例とともに公開する。

研究テーマ2「機能継続・早期復旧を可能とする大地震対策建築モデルの開発」

大都市中心エリアにおける既存の防災拠点施設（超高層建築などの重要施設や地域活動拠点となる避難所・体育館など）を対象として、大地震時の機能継続・早期復旧を目的とする構造・非構造部材の効果的な補強法と総合的な耐震性能評価法を開発する。具体的には、①耐震・制震補強による高耐震性能の構造躯体の補修モデル（数百年に1度のレベル2地震動でも在館を可能とし、数千年に1度のレベル3地震動でも倒壊しない構造躯体）、②大変位・大加速度振動台を活用した安全な室内空間と機能継続を可能とする非構造部材の補修モデル（天井・内外装材・設備機器を対象）、さらに①②の成果を活用した、③災害後の機能継続・早期復旧の視点からの総合的な耐震性評価法（resilience based design 手法）と既存建築の使用継続性能チェックリスト、をそれぞれ提案する。開発モデルの検証は、①構造躯体は3次元地震応答シミュレーションと既存実験等との比較検討、②非構造部材は大変位・大加速度振動台による実大実験、③研究テーマ1との連携による実建物（超高層及び体育館）への適用と防災訓練等を活用したアンケート・ヒアリング調査等で、それぞれ行う。

研究テーマ3「エリア防災拠点をつなぐ自立移動式災害対応支援ユニットの開発」

地域防災拠点（エリアの現地本部や避難所等）において、災害時に情報通信面、必要最小限のエ

エネルギー供給面、救急救護面のサポートを行う、自立移動式ゼロエネルギーユニット (D-ZEV: Disaster-robust Zero Energy Vehicle)を開発する。このユニットは、①自然エネルギーを活用した発電・蓄電設備、長距離無線 LAN・DTN/ICN 技術を活用した非常用通信設備、および、応急救護・災害医療活動を支援する空調システムを掲載した自動車 (D-ZEV 本体)、および、②小回りが利き、エリア情報を収集する通信ユニットを掲載する二輪自動車の D-ZEV mini、で構成される。開発ユニットは、研究テーマ 1 との連携による各年度の防災イベント・地域防災訓練等で使用し、アンケート・ヒアリング調査を実施し、その有効性を検証のうえ、最終年度の実証実験を経て、実施・適用例とともに公開する。

一方、社会実装事業では、得られた成果と適用例を全て公開し、自治体（新宿区など）・住民・事業者（新宿区や新宿駅周辺防災対策協議会、新宿駅周辺地域都市再生緊急整備協議会、自主防災組織である避難所運営管理協議会など）・外国人居住者・来街者等との連携による講習会・セミナー・防災訓練など各種防災イベントを開催し、成果の普及キャンペーンを実施する。社会実装化への効果の検証は、各種イベントでのアンケート・ヒアリング調査に加え、新宿区と連携した区政モニター（年 4 回、1 千人規模で実施）や区民意識調査（年一度、2～3 千人規模で実施）、さらに市民向け公開講座・地域防災訓練等によるヒアリング・アンケート調査等によって行う。

事業実施体制

図 2 に本事業の実施体制を示す。本事業は研究開発事業と社会実装事業で構成し、事業の統括は佐藤光史・学長と鷹野一郎・副学長をリーダーとする総合研究所運営委員会が行い、基本方針は理事会・教授総会・代議員会による承認を経て実施される。研究開発事業は総合研究所・都市減災研究センター（Research Center for Urban Disaster Mitigation; UDM）により、参加する 16 名の学内教員と多数の学外の研究協力者・研究機関との連携により 3 つの研究テーマで実施する。一方、社会実装事業は、総合企画部・広報課と UDM センター長・研究テーマリーダー、および外部コンサルタントとの連携により、得られた成果の広報・普及キャンペーン等を推進する。外部連携機関として新宿区および地元事業者・住民による自主防災組織（新宿駅周辺防災対策協議会など）と密接に連携し、毎年、成果報告書の発行と成果報告会を実施し、自己点検・評価委員会と外部評価委員会の審査を経て、事業の点検と修正を行う。

おわりに

本事業は昨年 11 月に開始したばかりであるが、先行している関連研究の成果を踏まえ、学内外の多くの研究者・実務者等と密接に連携して様々な成果をあげている。本報告書や報告会等を通じ、多くの方々より忌憚ない意見を頂きながら有用な成果をあげ、本学及び新宿区の防災・減災対策の推進とブランディングに寄与して行きたいと考えている。

2017 年 3 月

工学院大学学長

都市減災研究センター長

佐藤光史

久田嘉章

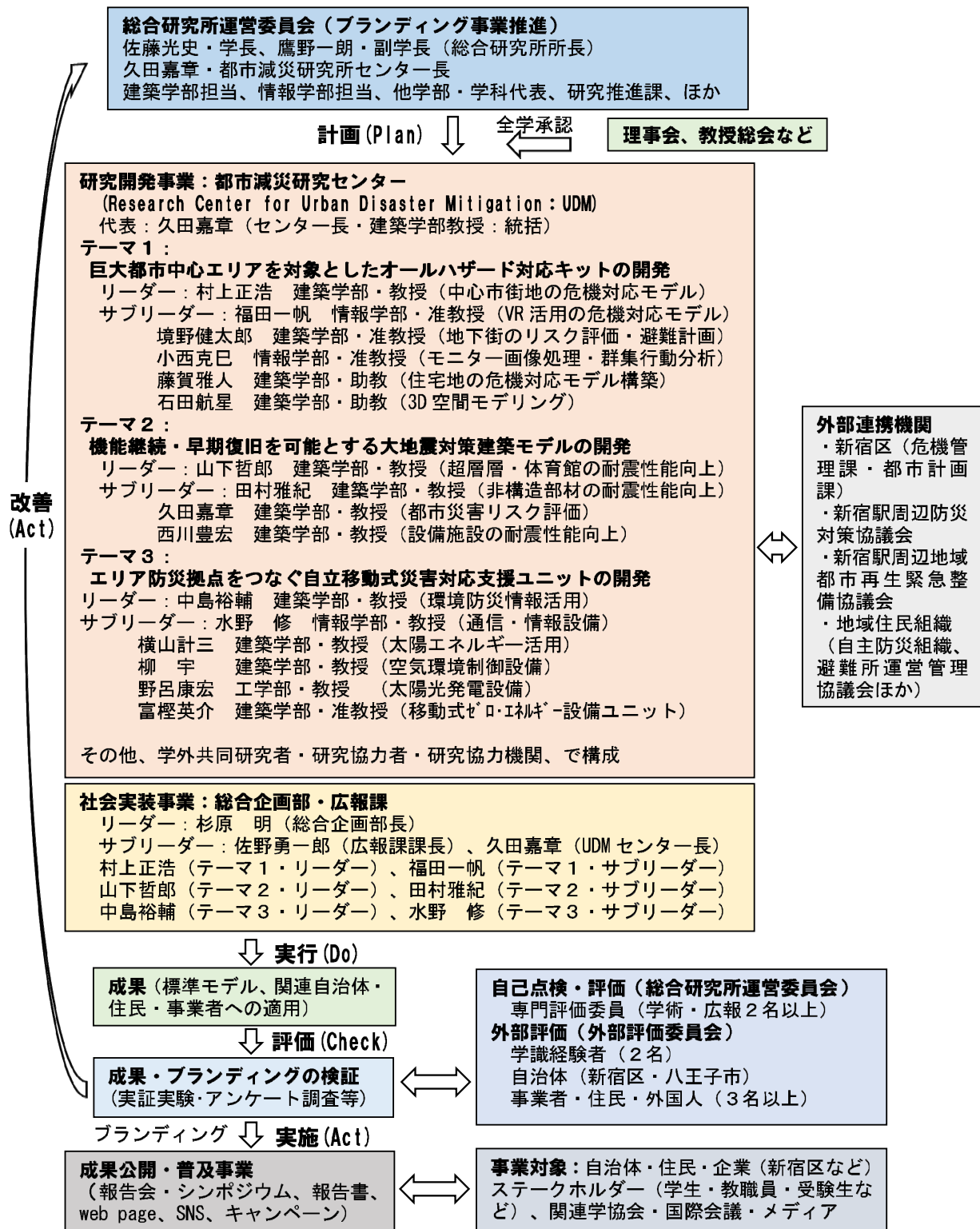


図２ 本事業の実施体制（2016 年度）

大都市中心エリアを対象としたオールハザード対応キットの開発

大都市中心エリア、都市型複合災害、ICT、
災害の可視化、エリア防災計画

村上正浩* 境野健太郎**
藤賀雅人***

1. はじめに

2020 年東京オリンピック・パラリンピックを控え、大都市・東京では、首都直下地震などの震災だけでなく、近年の異常気象に起因した集中豪雨による水害など都市型複合災害への対策が焦眉の課題である。

本テーマでは、一日の乗降客数が 350 万人超の新宿駅を核とする新宿駅周辺地域および郊外部の住宅地の大都市中心エリアにおいて、発生が懸念される震災と水害に起因する都市型複合災害の仮想体験からエリア防災計画策定、訓練実施を支援するツール群（オールハザード対応キット）を開発する。

2. 研究概要

新宿駅周辺地域には、事業者や新宿区医師会、防災関係機関、新宿区等で構成される新宿駅周辺防災対策協議会がある。当地域では、本協議会の構成員を主な対象として「災害対応の知識・経験を得るためのセミナー」（年 5 回程度、図 1 左）、「実践的な技能を習得するための講習会」（年 4 回程度、図 1 中央）、「身につけた知識・技能を活かす地震防災訓練」（年 1 回、図 1 右）を体系化した教育訓練プログラムを継続して実践し、自助と共助によるエリア震災対応の仕組みづくりを進めている（図 2）。2016 年にはその仕組みを実効性あるものにするため、発災後からの来街者や協議会構成員の震災対応行動をタイムライン化した地



図 1 教育訓練プログラムの実施例

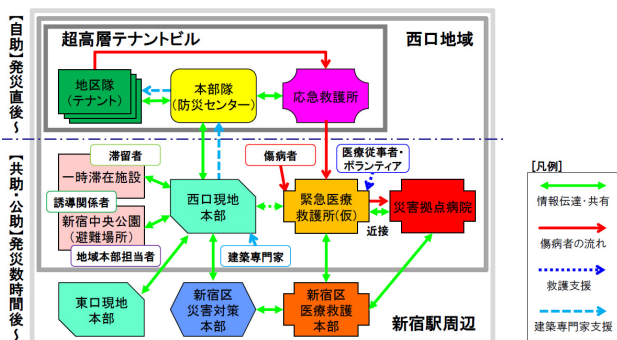


図 2 新宿駅周辺地域のエリア震災対応の仕組み

域行動計画を策定した。また、2015 年の水防法改正に伴い、当地域の地下街・地下道管理者およびそれに接続するビル管理者が参加する東京都地下街等浸水対策協議会において浸水対策計画の策定も進められている。

一方、新宿駅周辺地域の郊外部の住宅地には、町会の自主防災組織や幾つの自主防災組織で構成する避難所運営管理協議会がある。こうした組織においても、防災点検マップづくりや発災対応型防災訓練、避難所運営訓練、さらに復興期を見据えた復興模擬訓練を通じて、自助・共助の担い手の育成と住民主体の震災対応の仕組みづくりを進めている。

本テーマでは、これら既存組織・活動と連携し、アンケート・ヒアリング調査および訓練への適用により開発ツール群の有効性を検証したうえで、他地域に展開可能な標準化ツールとして社会実装を目指す。

表 1 が本テーマの研究実施体制である。建築学部と情報学部の各教員がそれぞれの専門性をいかし、以下のツール群の開発を担当する。初年度は各ツールの開発環境を整備し、2 年度から 3 年度にかけてプロトタイプを試作とヒアリング調査等による有用性の検証を行う。4 年度には訓練等への適用を通じてプロトタイプのブラッシュアップを図り、最終年度にはキットを完成させ成果を公開する。

- ①マルチハザード認識ツール：VR(仮想現実)や AR(拡張現実)の情報技術の活用によって仮想・現実空間で都市型複合災害を模擬体験できるツールを開発する。
- ②エリア防災計画策定ツール：高層ビルの被災度判定システムや地下街への浸水感知といったモニタリング技術、さらにドローンによる群衆映像から、災害の予防および災害発生時の対応に必要な情報を抽出す

表 1 研究実施体制

担当者	所属	主な役割
村上正浩 (リーダー)	建築学部・教授	中心市街地の危機対応モデル
福田一帆 (サブリーダー)	情報学部・准教授	VR 活用の危機対応モデル
境野健太郎	建築学部・准教授	地下街のリスク評価・避難計画
小西克巳	情報学部・准教授	動画画像処理・群衆行動分析
藤賀雅人	建築学部・助教	住宅地の危機対応モデル
石田航星	建築学部・助教	3 次元モデリング

るための動画像処理技術と群衆行動分析手法等を援用し、事前の災害対応行動計画・行動ルール策定のモデルとなるツールを開発する。

③オールハザード対応訓練ツール：3次元モデリング技術とVR技術の併用により都市型複合災害を可視化した仮想空間を構築し、災害の規模・時間帯など各種条件に対応した災害状況における人の行動・心理実験や訓練を行うことができるツールを開発する。

3. ドローンによる情報収集および情報提供実験

本研究テーマにおいて、筆者らはエリア防災計画策定ツールの開発を主に担当する。本年度は、ツール開発のための環境整備に重点をおきつつ、新宿駅周辺地域のエリア震災対応（図2参照）においてドローンの活用可能性を検証する実験を行った。

本実験にあたり、図3の設備（ドローン、モニター類、Webカメラは除く）を購入したうえで、西口現地本部（工学院大学）・新宿区災害対策本部（新宿区役所）・避難場所（新宿中央公園）間にFWA（Fixed Wireless Access）無線による通信網を構築し、各拠点にドローンからの映像を受信するためのコーディング機器と各拠点の状況把握のためのWebカメラを設置した。

実験の結果、避難場所上空で飛行するドローンで撮影した映像を、西口現地本部・新宿区災害対策本部間でリアルタイムに共有することができた（図4）。なお、撮影にはハイビジョンカメラに加えて、夜間の情報収集を想定してサーモグラフィーカメラも使用したが、各拠点間のFWA無線のスループットは95Mbps程度で、そのうちドローンからの映像のトラフィックは21Mbps程度、Webカメラ映像のトラフィックは10Mbps程度であった。また各拠点間での映像伝送の遅延時間は最大でも11msec程度でパケットロスも殆どなく、十分な映像伝送と各拠点での高画質の映像受信が可能であることが確認できた。

並行して、ドローンにスピーカーを登載し、上空から地上への音声情報の提供可能性も検証した。周辺の騒音状況にもよるが、飛行場所から半径170m程度であれば100m上空からの音声も十分に聞き取れることがわかった。

4. おわりに

本年度の実験では、高層ビル街での俯瞰的な情報収集と災害対応活動へのドローンの活用可能性を確認した。実験結果を受け、ドローンを除く購入設備は本

年度末までに工学院大学・新宿区役所・新宿中央公園に常設する予定である。次年度はプロトタイプを試作に向け、動画像処理技術と群衆行動分析手法を導入したドローンからの映像解析、さらに研究対象を地下街等にも拡大し複合災害のリスク検討などに着手する。

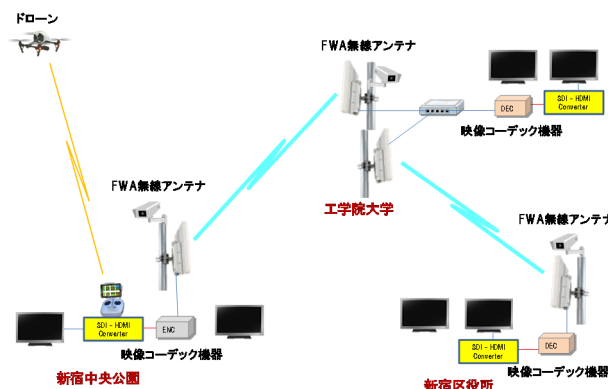


図3 実験で用いた設備の全体構成

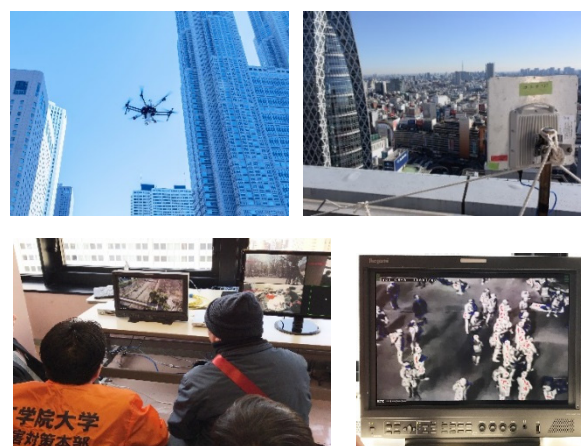


図4 実験の様子（左上：新宿中央公園上空で飛行するドローン、右上：工学院大学屋上のFWA無線アンテナ、左下：西口現地本部でのドローンからの映像受信、右下：西口現地本部で受信したサーモグラフィー映像）

謝辞

本研究では、内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「レジリエントな防災・減災機能の強化」による「首都圏複合災害への対応・減災支援技術」、文部科学省・都市脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト「都市災害における災害対応能力の向上方策に関する調査・研究」による「中心市街地における効果的な災害対応能力向上のための教育・訓練システムの開発」、および新宿区の委託研究の成果の一部を活用させて頂いています。また、ドローンによる情報収集・情報提供実験は、ドローンを保有する損害保険ジャパン日本興和株式会社をはじめ、SOMPO リスクアマネジメント株式会社、株式会社理経、新宿区危機管理担当部のほか、新宿駅周辺防災対策協議会、株式会社 NSi 真岡、アイベックステクノロジー株式会社、日東通信株式会社と共同で実施しました。

* : 工学院大学建築学部まちづくり学科, ** : 工学院大学建築学部建築学科

*** : 工学院大学建築学部まちづくり学科

VR、動画画像解析、視線計測を利用した都市災害時の対応モデル、訓練ツールの開発

キーワード：VR、動画画像解析、視線計測、行動、心理

福田一帆*

小西克己**

1. はじめに

巨大都市の災害においては、地下から高層階への階層構造、大群衆の行動、避難スペースの不足などの要因から、人の行動が被害状況に大きく影響をおよぼすことが想定される。特に、巨大都市における災害については、多種多様な人々が集まるため災害時の人々の行動の予測が難しい。そのため、災害への有効な危機対応モデルを構築、適用するためには、人々の行動や心理を理解した上で危機対応モデルを作成すること、また被災状況や災害時の人々の行動を速やかに把握することが不可欠である。

そこで、都市災害体験ツールとして、VR空間に都市災害を再現して各種条件に対応した災害状況における行動・心理実験を実施する。また、動画画像処理技術により映像からの被災状況把握手法を開発する。更に、都市災害を可視化した3Dバーチャルリアリティ防災啓発・訓練用コンテンツを作成し、建物被害の確認や避難誘導等のトレーニング・訓練の効果の検証をおこなう。VRを利用した防災啓発・訓練用コンテンツとしては、「浸水・火災疑似体験アプリ(1)」「バーチャル災害体験コンテンツ(2)」など、この数年に様々なものが開発されているが、都市災害に適したコンテンツが必要である。

2. 研究計画と成果

2.1 VRによる都市災害状況可視化コンテンツ作成

新宿西口エリアの3Dデータを作成して、VRシミュレーションソフトウェア（Forum8 UC-win/Road）に取り込み、歩行者などの交通流を発生させる。3Dデータの作成には3Dスキャナ計測データおよび写真解析3Dモデル生成ソフトウェア（Agisoft PhotoScan）を利用する。また、曜日・時間帯別の新宿滞在者の人数、天候・時間帯の変化など想定される様々な条件下での災害状況の可視化をおこなう。

本年度は作業環境の導入および、データの試作をおこなった。図1～2に試作したVRデータからキャプチャしたシーンを示す。図1は、サンプルとし

て提供されている交差点データに、VRソフトの機能を利用して歩行者流を発生させて、その上空を飛行するドローンからの視点を模擬した映像を作成した結果である。図2は工学院大学地下1階エントランスを撮影した複数写真から、写真解析ソフトウェアを使用して3Dモデルを生成してVRソフトウェアに取り込み、歩行者流を発生させた結果である。

今後は、（1）災害発生時の被災者の行動分析実験、（2）防災啓発・訓練用コンテンツの作成、（3）ドローンや固定カメラを利用した災害状況把握方法開発のための模擬映像作成、（4）避難スペースへの効率的な誘導方法の検討、などに利用するVRデータの作成を進める。

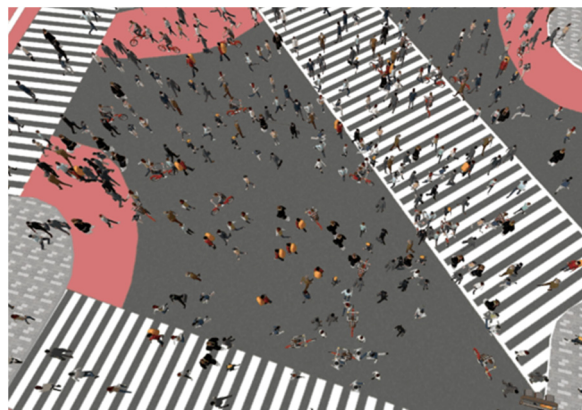


図1. VR試作結果1（ドローン空撮模擬映像）



図2. VR試作結果2（工学院大学地下1階入口）

2.2 専門家の視線計測結果を利用した建物被害状況判断モデルの構築と訓練コンテンツの作成

都市災害では避難スペースの不足が問題となり、避難所として利用可能な建物と、立ち入り禁止にす

*：工学院大学情報学部情報デザイン学科， **：工学院大学情報学部コンピュータ科学科

べき利用不能な建物を迅速に識別することが必要である。現状、建物の被害状況の初期確認は事業者の責務とされているが、一般的に事業者は建物の被害状況把握のために必要な知識や経験を有さない者が大半であり、専門家が被災時に迅速に現地にて建物の状況を確認することも難しい。そこで、この問題を解決するために、ビルの事業者に対する建物被害状況把握の教育訓練ツールを作成する。

建物被害状況判断モデルの構築と訓練コンテンツの作成にあたり、モバイル型アイマークレコーダー（EMR-9、ナックイメージテクノロジー）を使用して専門家による建物被害状況確認時の視線の動きの時系列データを取得して分析をおこなう。

今年度は視線計測装置の導入および、計測試験をおこなった。図 3 に新宿駅西口から都庁方面へ続く地下通路の工学院大学入口前において歩行時の視線計測をおこなった計測例を示す。次年度は、災害時を想定した建物被害状況判断の訓練をおこない、専門家と一般の視線計測データを取得して特徴を比較、分析する。



図 3. 視線計測予備測定（図中の○印が視線位置）

2.3 動画画像解析による災害状況把握アルゴリズムの開発

大都市における災害では、災害後の人々の密集や異常行動などに起因する 2 次災害が生じる可能性がある。このような 2 次災害による被害を防ぐため、人々の行動を素早く把握し、危険箇所を迅速に特定する必要がある。そこで、定点カメラやドローン等により撮影された動画を解析することで、これらの危険箇所を特定するアルゴリズムの開発を行う。

今年度は、ビルの屋上等に設置された定点カメラを想定し、群衆の中で異常行動する人物を検出するアルゴリズムの開発に取り組んだ。動画画像中の歩行

者を検出し、その動き（速度ベクトル）を算出することで、その後の動きを予測し、予測した動きと極めてことなる動きをした人物を異常行動人物として特定する手法である。同アルゴリズムにより、図 6 のように適切に歩行者を検出することができている。また、突然走り出したり、向きを変える歩行者の検出も可能となっており、突然動きを変えた人物の特的高い精度で可能であることを実験により確認している。これらの成果は国際会議で発表した⁽³⁾。

今後は、突然動きを変えた人物が本当に「異常」であるかを判断するアルゴリズムの開発、および、群衆の密集地帯を特定するアルゴリズム、さらに、群衆の動きから危険地域を特定するアルゴリズムの開発を行う予定である。

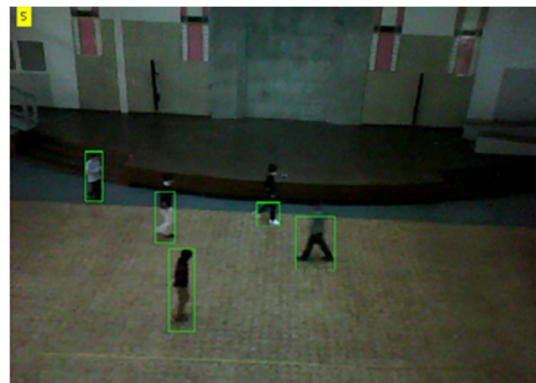


図 4. 検出された歩行者

3. おわりに

今年度は、各テーマ研究環境の整備およびデータの試作、予備的な実験を実施した。次年度は、各テーマの研究および、VRデータの試作を進める。3 年次に試作モデルを完成させて、フィードバックを得た後、5 年次に改良した最終版を完成、公開する計画とする。

参考文献

- 1) 板宮朋基, 神保貴彰, 四村好紀, 幸村衡, 北河佑基, ヘッドマウントディスプレイを用いた洪水疑似体験システムの開発と市民啓発への応用, 日本バーチャリアリティ学会サイバースペースと仮想都市研究会 CSV2016-5, 25-28 頁 (2016)
- 2) 永山武志, パーチャル災害体験コンテンツ, NTT 技術ジャーナル, 2006.9
- 3) Akira Horinouchi, Katsumi Konishi, An Emergency Detection Algorithm for A Security Camera using Optical Flow, Proc. of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, 2017

建築分野における A R・V R 技術の基礎的研究

VR, AR, ターゲット, 情報端末, BIM

石田航星*

1. はじめに

建築分野においても ICT 技術は重要な技術であるが、欧米の情報産業が中心となって新技術を開発することが多く、我が国の建築分野では、ICT 技術については専ら外来の技術を援用することが多い。また、ICT 技術の進歩は急速であり、建築分野内での自前主義的な開発方法では、ICT 技術を取り巻く環境変化に対応できない可能性が高い。そこで、2016 年度の研究においては、昨今、普及が著しい BIM に至るまでの技術開発の歴史を整理することで、“BIM” の位置付けを確認し、次の技術開発テーマとして有望な AR/VR 技術の可能性に関して検討を行った。その上で、建築分野における AR/VR 技術の利用方法を検討し、開発環境の構築を行った。

2. BIM に類する技術の整理

BIM が我が国に本格的に導入されたのは 2009 年頃だと言われており、この事実は以下の図 1 に示す 2009 年以降の B I M に関する研究数の推移からも確認できる。BIM は、CALS や情報化施工のように ICT 技術により建築分野の生産性向上を目指す技術であるが、過去に例がない速度で技術開発が行われていると言える。

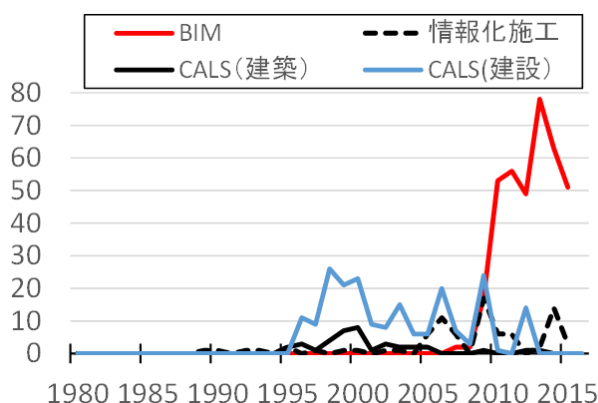


図 1 Cinii での BIM に関する研究数の推移 ¹⁾

ただ、BIM という技術自体はまったく新しい発想ではなく、その基礎的な構想は 1970 年代の CAD システムの自社開発の時代まで遡ることが出来る。また、3次元設計と構造・環境・生産設計の一体化は 1980 年代の CAE でも想定されており、建物情報を設計から施工・施設管理まで分野横断的に利用することは 1990 年代のコンカレントエンジニアリングにおいても提唱された概念である。一方で、ネットワークの通信速度とコンピュータの処理速度の飛躍的な向上もあって、前述の技術的構想を実用レベルで利用可能な形でまとめた技術が BIM であると考えられる。

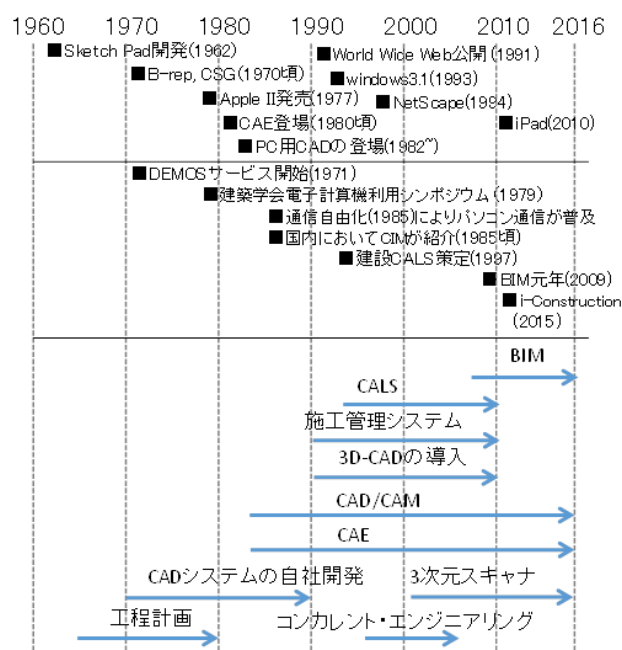


図 2 建築生産における ICT 技術導入の流れ ²⁾

3. 3次元モデルの利用方法としての VR/AR 技術

仮想空間上に構築した建物の 3D モデルを利用する研究や技術開発は少なくとも 20 年以上の歴史があるが、その実用化に際して 3D モデルを作製するコストの高さが大きな障害となっていた。一方で、BIM の本格的な普及は、多くの新築工事において 3次元モデルが作成されることを意味しており、少な

* : 工学院大学建築学部建築学科

くとも新築の建物においては 3D モデルが存在することを意味し、実用化の障害がなくなることを意味している。また、既存建築物でも、ソフトウェアの高度化により 3D モデル作成自体が容易に行えるようになっており、高層ビルの BIM モデルの製作も簡易なものであれば 1 週間ほどで可能である（図 3）。

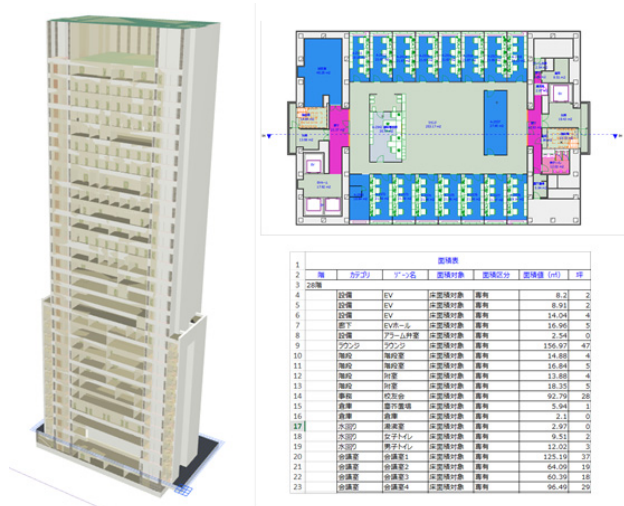


図 3 作成した BIM モデルの例 ²⁾

そこで、本研究においては建物の 3D モデルを積極的に利用する方法として、AR/VR 技術に着目し、基礎的な研究を実施した。VR 技術は仮想空間内への没入感に優れ、操作者に臨場感を与えることが可能であるため、安全教育などへの利用が期待できる。AR 技術は、タブレット端末やスマートフォンなどの持ち運びやすい機器での 3D モデルの閲覧を容易するため、ファシリティ・マネジメントなどへの利用が期待できる。

AR 技術と VR 技術は根本的には異なる技術であるが、これら技術を統合的に開発できる環境としてユニティテクノロジーズ社が提供する Unity がある。Unity はゲーム開発環境として公開されているが、ArchiCAD などの BIM ソフトで作成した 3D モデルを 3ds ファイルに変換することで読み込み可能であるため、これを利用した。また、AR アプリの開発のためにはターゲットマーカを認識する AR カメラが必要となるが、本研究・開発においては Vuforia を利用する。

2016 年度においては、BIM 上で作成した 3D モデルを利用して AR/VR 開発を実施するために必要な条件を調査し、図 4 に示すようにこれら技術の開発の環境を整備した。その上で、2017 年度以降は多くの

研究室で横断的に開発が実施されることが想定されるため、VR/AR 技術を含む 3D ソフトウェアの開発方法に関するマニュアルの整備を重点的に実施した（図 5）。

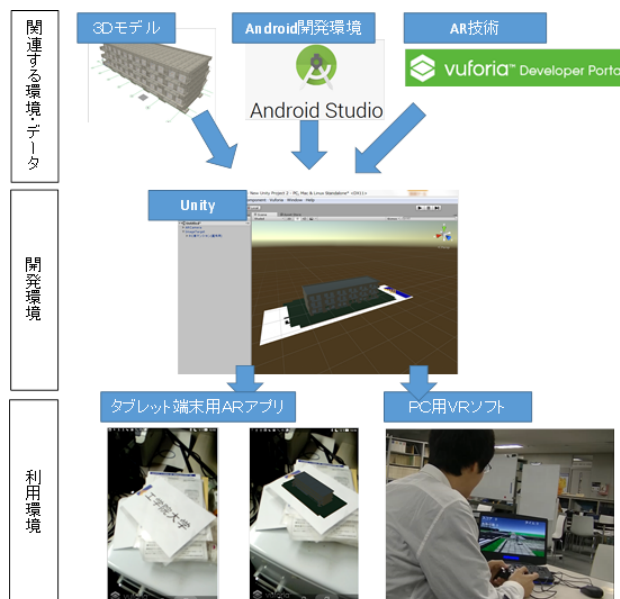


図 4 AR/VR 技術の開発環境

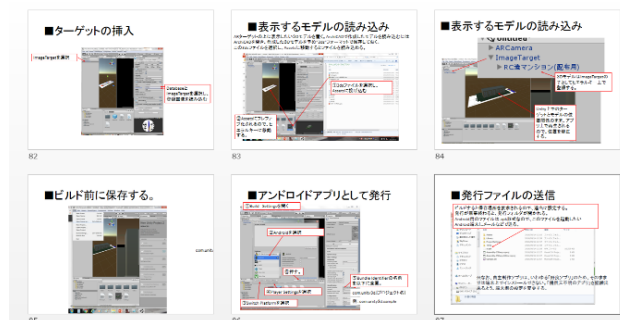


図 5 AR アプリ開発のマニュアルの一部

4. おわりに

次年度においては、安全教育を目的とした VR ソフトウェアの開発を行う。また、学生を被験者として、その教育効果の確認を実施する。

参考文献

- 1) 石田航星、人口減少社会と建築生産における ICT 技術、建築コスト研究、pp. 7-16、2016. 10
- 2) 石田航星、3 次元モデルと大学施設の維持・管理の連携手法に関する研究、第 32 回建築生産シンポジウム論文集、pp. 127-132

テーマ 2：機能継続・早期復旧を可能とする大地震対策建築モデルの開発

超高層 制振ダンパー 長周期地震動 体育館 機能維持

山下哲郎* 田村雅紀* 久田嘉章** 西川豊宏***

1. はじめに

ここでは社会的背景や UDM の成果を踏まえ、テーマ 2 の目的と課題を概観する。また 2016 年度研究成果の概要を報告する。

1.1 研究の社会的背景

テーマ 2「機能継続・早期復旧を可能とする大地震対策建築モデルの開発」は、都心部で膨大な人数が勤務するオフィスとして用いられる鉄骨造高層建築と、地震後に地域の避難所や防災拠点として使用されることの多い体育館を主な研究対象とする。

近年、東日本大震災や熊本地震を受け、建物の設計に用いられる地震動のレベルと設計目標を見直す動きがある。例えば東京都の提案（表 1）¹⁾では、従来の建築基準法で想定されていた L1（稀な地震動）、L2（極稀な地震動）に加え、L2 の 1.5 倍の L3 レベルが追加されている。また許容される被害レベルとして L2 に対し軽微な補修程度で再使用可能、L3 に対し倒壊しないこととしており、従来の L2 に対し崩壊しないことを目標としていた建築基準法²⁾より要求性能が上がっている。

上記の要求を満たすには、第一に構造骨組の顕著な損傷を避けることが必要である。次に東日本大震災で大きな被害を招いた、天井や設備などの非構造材の脱落も避けなければならない。これらを実現するには、敷地に想定される地震動に対する建物の応答を求め、算定された加速度や変形より構造体や非構造材の大地震後の損傷を評価し、必要に応じて補強したり、免震や制振により応答を低減することが必要になる。また、建物使用者が地震後の状況を観察し、建物内への滞留や使用の可能性を判断する方法も必要であろう。

現在の建築基準法や耐震診断基準^{3,4)}は、全国一律に定められた地震入力に対し、保有耐力と変形性能の積で評価される耐震性能が上回ることを静的解析で確認するもので、L2 レベルの地震動に対し構造体の損傷を許容するが、その損傷レベルは分かりやすい形

では示されていない。地震後の継続使用性は保証しておらずその判断基準を与えるものでもない。現代の大都市で L2 地震後に要求される具体的な機能は以下のようなものである。

- 1) 高層オフィスビルにおいては、数日間建物に滞留可能なこと。
- 2) 体育館においては、避難所等予め想定される機能に支障が生じないこと。

表 1 東京都臨海部に建設される超高層建築物等の設計目標²⁾

耐震レベル	入力地震動	構造物の特徴	想定する地震発生	上部構造			基礎
				部材の状態	最大層間変形角	層の最大塑性率	
中地震 (L1)	既往波 (25cm/s) 告示波 (種)	無被害 【機能維持】	数十年に一度発生	短期許容応力度内	1/200 以内	—	短期許容応力度内
大地震 (L2)	既往波 (50cm/s) 告示波 (極稀) サイロ波 (個別・包絡) (長周期地震動を考慮)	軽微な補修により 事業継続可能 【指定機能維持】	数百年に一度発生	部材の塑性率が 4.0 以下	1/100 以内	2.0 以下	脆性的破壊を生じない
極大地震 (L3)	告示波 (極稀) の 1.5 倍程度 (長周期地震動を考慮)	倒壊・崩壊させない 【余裕度の検証】	数千年に一度発生	建物の用途・特徴に応じて個々に設定 (極大地震動が建物に入力した場合の性状を把握した上で判断)			

1.2 UDM における研究

上記のような背景をもとに、UDM(2010-2015)においては以下のような研究活動を実施してきた。

1) 高層ビルに関する研究

既存高層ビルについては、鉄骨造地上 127m、29 階建の工学院大学新宿校舎を使用して大地震対策モデルの検討を行ってきた。

当ビルは大半の高層オフィスビルと同様鉄骨造であり、加速度計が装着されている。図 1 に構造骨組の概要、表 2 に固有周期と減衰を示す。竣工が 1989 年

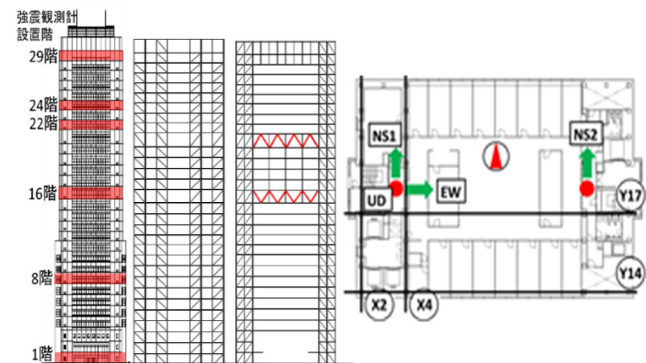


図 1 加速度計配置と構造概要

* : 工学院大学建築学部建築学科 教授, ** : 工学院大学建築学部まちづくり学科 教授

*** : 工学院大学建築学部まちづくり学科 准教授

表 1 固有周期と減衰定数

NS				EW			
次数	立体モデル	311観測	減衰定数	次数	立体モデル	311観測	減衰定数
1	3.080	3.080	0.019	1	2.994	2.960	0.012
2	0.979	0.950	0.012	2	1.035	0.990	0.012
3	0.502	0.470	0.030	3	0.551	0.502	0.030

であり、以降発生した兵庫県南部地震、東北地方太平洋沖地震等で得られた知見や耐震性向上策は反映されていない。耐震設計に関する当時と現在の条件を比較すると

- 1) 当時、免震、制振技術は初期の開発段階であり、制振ダンパーは装着されていない。
- 2) 設計時に使用したコンピューターの性能は現在より格段に低く、設計には構造骨組を各階毎に質点とバネに置換する簡略化した質点系モデルを用いた地震応答解析が用いられている。
- 3) 入力地震動はいわゆる標準 3 波と呼ばれる観測波で、現在設計に用いられる告示波は用いられておらず、最大入力レベルは L2 である。
- 4) 兵庫県南部地震で多数生じた梁端溶接部の破断を受けて開発された溶接部ディテールの改良案や、高靱性を保証する鋼材(SN 材)は使用されていない。
- 5) 天井、設備等の非構造材に関する耐震設計は基本的に行われていない。

このように大臣認定を受けて建設されている超高層でも、現在に要求される耐震性を満足するかどうかは不明であるため、UDM においては

- 1) 地上部の全構造部材を再現した 3 次元モデルを構築した⁵など。
- 2) 東北地方太平洋沖地震における強震記録の分析による振動特性の同定と、同定した振動特性に合わせて 3 次元解析モデルのチューニングを実施した⁶。
- 3) 想定される地震動に対する応答評価と、制振ダンパーによる応答低減方法の検討⁷などを実施した。
- 4) 東北地方太平洋沖地震で落下したシステム天井の振動台実験を実施し、落下メカニズムや加速度を特定した⁸。尚、振動台では別のタイプのシステム天井の実験⁹や、設備と天井の干渉実験¹⁰なども実施し、非構造材落下のメカニズムを実証的に研究してきた。
- 2) 体育館に関する研究

学校施設の大半が耐震診断、改修を完了しているため、大都市部で新耐震以前の耐震性の低い学校体育館が残されている可能性は低いと考えられる。しかしながら東日本大震災においては、構造体には顕著な被害がなくても大きな応答加速度により天井や吊物が落

下したり、外装材や窓に脱落等が生じて避難所として使用不可能になる例が多く見られた。また熊本地震では耐震補強された体育館でもブレースが切れるなどの被害が生じている。

また、市民体育館の規模では鉄筋コンクリート構造の上に鉄骨造の屋根が載る形式のいわゆる置屋根構造が多いが、両地震において、新耐震以降の建設でも鉄筋コンクリート上で屋根を支持する支承部（図 2）の被害が多発しており¹¹、特に熊本地震では支承部だけでなく、支承部周囲の屋根トラスにまで顕著な損傷が生じた例が報告されている¹²。また置屋根構造の応答特性自体も十分に解明されていない。

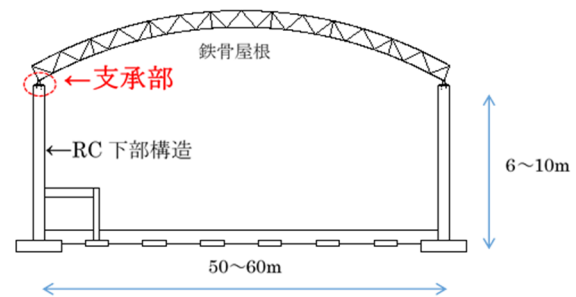


図 2 一般的な市民体育館の断面構成

以上より、UDMでは以下の研究を実施してきた。

- 1) 鉄骨造学校体育館では桁行方向ブレース構造の弾塑性応答評価と限界耐力計算の適用性¹³に関する研究。
- 2) 実験による置屋根構造支承部の力学的特性の解明。^{14,15,16 など}

上記の成果の一部は学会指針¹⁷や耐震診断法¹⁸などに反映されている。

1.3 テーマ 2 の研究目的と体制

テーマ 2 においては、UDMの研究を継続、発展させた下記の研究を実施し、建築のモデルとして公開することで社会一般への展開を図る。

- 1) 高層ビルの大地震対策建築モデルに関する研究
高層ビルにおいては、前述した要求性能を達成するため、新宿校舎をモデルケースとして、被害の予測方法と低減策に関する研究を実施する。
具体的には以下の通りである。

① 3 次元モデルの精密化

現在の解析モデルでは考慮されていない、大変形領域における柱の塑性化などを取り入れ、特に L3 地震動に対するより精度の高い解析を可能にする。これには高速の PC が必要であるため 2016 年度予算を充当

して購入した。

②低サイクル疲労による部材破断の評価

鉄骨造の高層オフィスビルでは、長時間にわたる海溝型地震による長周期地震動の揺れで、梁端部の接合部に低サイクル疲労による破断が生じ、構造が不安定化することが懸念されている¹⁹⁾。

文献 20) は、梁端部の破断が多発した兵庫県南部地震の被害を受け、直下型地震による破断を想定してその評価方法を提案しており、2015 年度にはその方法を適用して新宿校舎の梁で試算を実施した²¹⁾。しかしながら直下型地震と長周期地震動による揺れは性質が大きく異なり、直下型地震に関する経験則に基づく同文献の方法は適用できない。

文献 22) はこの問題に対して、柱梁接合部の定振幅疲労試験を Manson-Coffin 則に基づき整理して疲労曲線を示し、Miner 則で累積損傷指標を算出する一般的な方法を提案している。新宿校舎への直接的な適用には工夫が必要であり、有限要素解析や実験などを併用する必要があると考えられるが、前述した 3 次元モデルによる解析ですべての梁部材の応力や変形の応答履歴が取得可能であるため、まず同文献の手法で破断リスクを評価する。

また新宿校舎の特徴として H 型鋼のブレースが主耐震要素として多数使用されているが、繰返し変形により顕著な座屈が生じることを有限要素解析で確認している（図 3）²³⁾。しかしながらブレースの低サイクル疲労については研究がごくわずかであり²⁴⁾、また結果は接合部のディテールに大きく依存すると考えられるため、こちらでも有限要素解析や実験を実施し、破断リスクの評価を実施する必要がある。

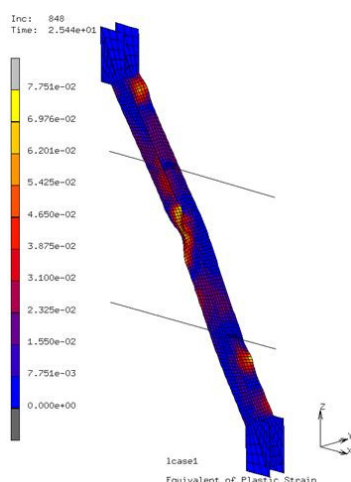


図 3 ブレースの有限要素解析

2) 体育館の大地震対策建築モデルに関する研究

①置屋根と支承部に関する課題

支承部に関する実験を継続するとともに、今までの実験で得た知見をもとに支承部の数値解析用復元力モデルを構築し、＜鉄筋コンクリート下部構造＋支承部＋鉄骨屋根＞から構成される体育館の 3 次元全体モデルによる非線形応答解析を実施し、支承部への損傷集中メカニズムを明らかにする。また安易な支承部補強は支承部周辺の屋根鉄骨の損傷を招きかねないが、支承部周辺の屋根部材に要求される必要耐力なども解析により明らかにする。

②学校体育館に関する課題

梁間方向の H 形鋼ラーメンの地震後のたわみを計測することにより地震で受けた損傷（塑性変形）を定量的に評価する方法の研究²⁵⁾を進める。桁行方向のブレースについても、地震後の状態から損傷を定量的に評価する方法の研究を実施したい。また必要に応じて 2017 年度に導入予定の高速ジャッキシステムを用いて振動実験を実施し、検証を行う。

3) 非構造材に関する研究

東日本大震災で被害の多かった在来天井については、告示²⁾や学会指針²⁶⁾が発行され、一応の安全対策が可能になった。しかしながら、都心のオフィスの多くには在来天井ではなくシステム天井が使用されている。また実際のビルの天井内には空調、照明などの設備や配管が複雑に設置され（図 4）、地震時には両者が干渉して複雑な応答となる。旧 UDM で導入した振動台を用いて、システム天井の実験^{8,9)}や設備と天井の干渉実験¹⁰⁾等を実施してきたが、一般的で簡易な天井、設備の診断方法や落下防止対策を提案するには至っていない。また現在の振動台により加振できる加速度は最大で 1 G 程度であるが、例えば告示²⁾で想定する加速度は最大で 2.2G であり、安全性を検証する実験としては加振能力が不足している。



図 4 天井内部の例

当事業で 2017 年度導入予定の高速ジャッキを動力とする振動台にて、天井、設備、間仕切壁などそれぞれ単体要素だけでなく、これらを組み合わせた実験を行い、診断法、落下防止対策などに繋げたい。

また非構造材、特に外装材は劣化が激しいため劣化診断方法が必要である。また非構造材が比較的短い周期で更新されることが多いことを考慮すると、リサイクル材料等の有効活用も考えられる。このような問題に対しては材料学的アプローチを試みる。

4) 実施体制

テーマ 2 研究の実施体制を図 5 に示す。

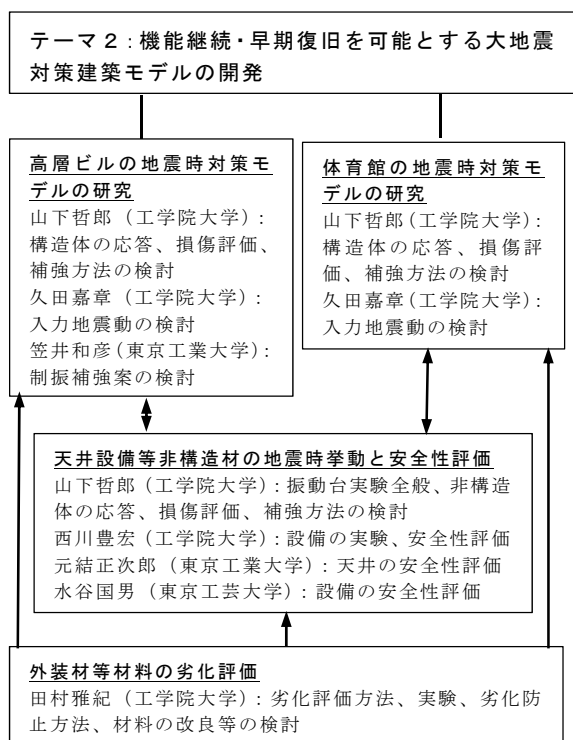


図 5 研究実施体制

2. 2016 年度の成果

2.1 既存高層ビルの大地震対策モデルの研究

1) 概要

2016 年度は、表 1 を鑑み、様々な L1-L3 レベル地震動を既往の 3 次元モデルに入力してその応答レベルを確認するとともに、文献 27) の手法を援用して効率的な配置としたオイルダンパー補強案の応答解析を実施し、その効果を検証した。また、梁端溶接部の破断に対しては、溶接部の応力を低減するため下フランジ端部をドッグボーン状に加工する RBS 工法の適用可能性について、有限要素解析を用いた検討を実施した。ここでは解析について概要を述べる。

2) 想定地震動

図 6,7 に入力地震動の速度応答スペクトルと加速度波形を示す。標準型地震動として、El-centro 波、ホワイトノイズ位相を使用した告示波の 2 種類、長周期・長時間地震動として東日本大震災、紀伊半島沖地震時に新宿校舎 1F で観測された位相スペクトルを用いて作成した東日本大震災使用告示（311 告示）、紀伊半島沖地震位相使用告示（紀伊告示）、活断層パルス型地震動として、1995 年兵庫県南部地震時に JR 鷹取駅で観測された波形（鷹取）、2016 年熊本地震時に西原村で観測された波形（西原）を使用する。なお、告示波の強さは L1, L2, L3（L2 の 1.5 倍）の 3 段階とする。また速度応答スペクトルより、鷹取と西原の強さは L3 レベルであることが分かる。

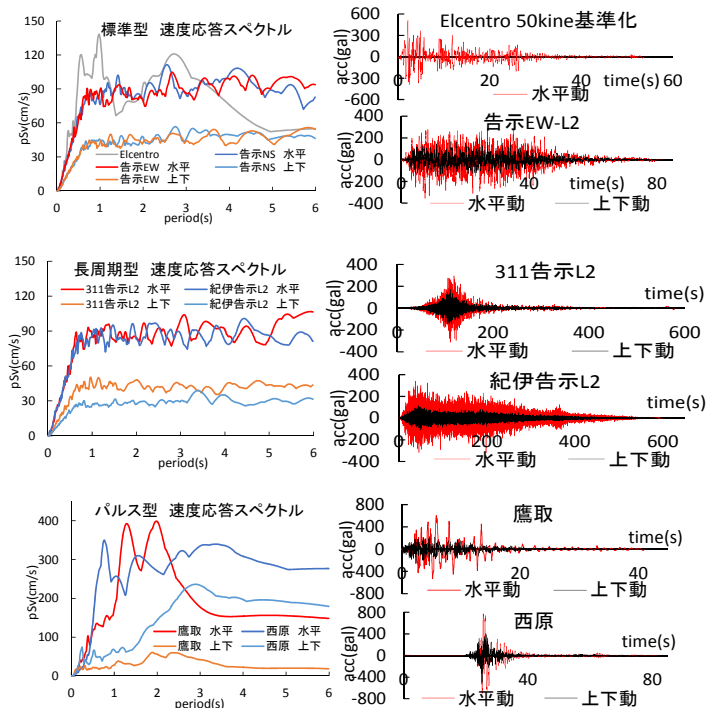


図 6 速度応答スペクトル
($h=0.05$)

図 7 地動加速度波形

3) 新宿校舎の応答と制振補強ケーススタディ

図 8 に無補強の新宿校舎立体モデル（D00）の最大応答層間変形角を示す。解析は時刻歴弾塑性解析で、モデルの振動特性は東北地方太平洋沖地震の観測結果とほぼ一致させている^{6,7)}。表 1 では L2 では最大層間変形角を 1/100 以内に抑えることが設計目標とされているが、部分的に上回る階がある。また、L3 でも告示波は 1/100 を若干越える程度であるが、上層階で鷹取、下層階特に EW 方向で西原の応答は大きく超過する。海溝型地震による長周期地震動による高層ビルの

揺れが注目されているが、最大変形に関する限り、長周期成分を多く含んだパルス性地震動の方が影響は大きい。

次にブレース型オイルダンパーで補強する案を図 9 に示す。ダンパー配置は文献 (27) を参考に以下のプロセスで定めた。

- 1) Ai 分布を外力分布とする弾性解析を実施する。
- 2) 層間変形角の大きな階、ならびに剛性ゼロのブレースを設置した場合に軸方向の伸縮が大きい箇所を特定し、ダンパーを計 40 台設置(D40)。
- 3) ダンパー総数を固定し、レベル 2 の El-centro 波を入力し、層間変形の小さな階から大きな階にダンパーを試行錯誤的に移動させ、最大層間変形角 1/100 となるダンパー配置を定める。この補強案を D40 とする。
- 4) 同様に試行錯誤により、ダンパー60 台を使用して最大層間変形角を 1/130 以下とした D60 補強案、84 台を使用して 1/150 以下とした D84 補強案を作成する。

図 10 に L1、L2 地震動による最大応答加速度を示す。NS 構面では D40 以上では大きな変化は見られない。L1 では D40 で最大 150gal 程度となる。

図 11 に L2、L3 地震動による最大層間変形角を示す。加速度と同様に、NS 構面では D40 以上で大きな変化は見られない。EW 構面では L2 において D40 でも層間変形角 1/100 以下を満足する。L3 入力に対してはパルス型地震動を除き D84 で 1/100 以下となるが、下層での変形が目立つ。パルス型では 1/100 を大きく上回る。西原のような活断層直下型の地震が発生する

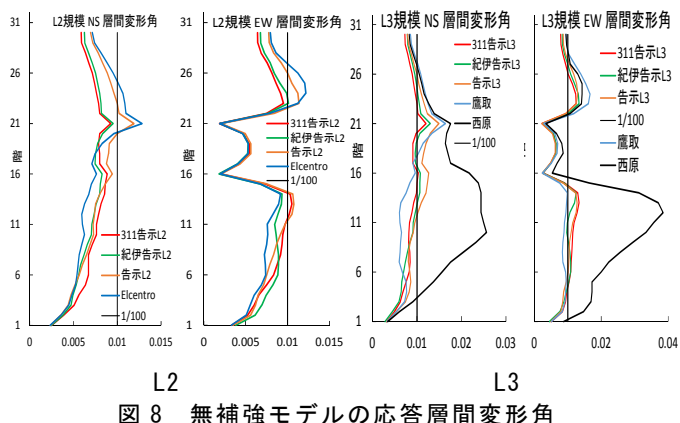


図 8 無補強モデルの応答層間変形角

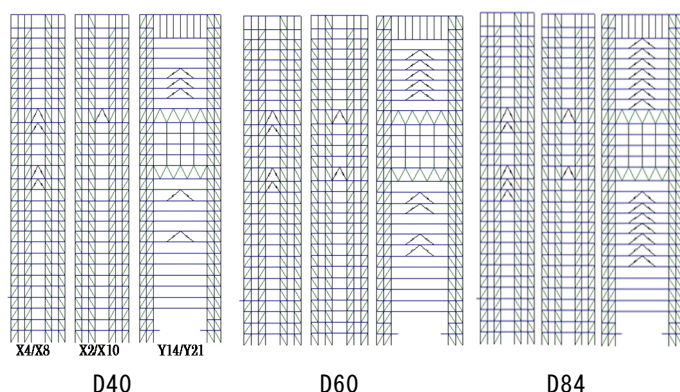


図 9 ダンパー補強モデル

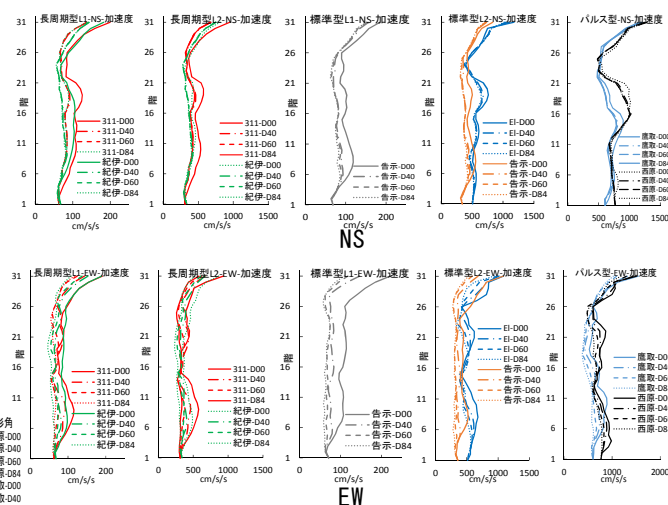


図 10 L1, L2 地震動に対する応答加速度

確率は低い、一旦発生すると構造の損傷は深刻で、再使用は不可能になる可能性が高い。

2.2 体育館の大地震対策モデルの研究

1) 概要

2016 年度の主な研究として、置屋根構造のピン支承部の摩擦及び破壊実験を実施した。

一般的に屋根の支承部は鉄骨造ビルと同様、ベースプレートを下躯体に埋め込んだアンカーボルトで固

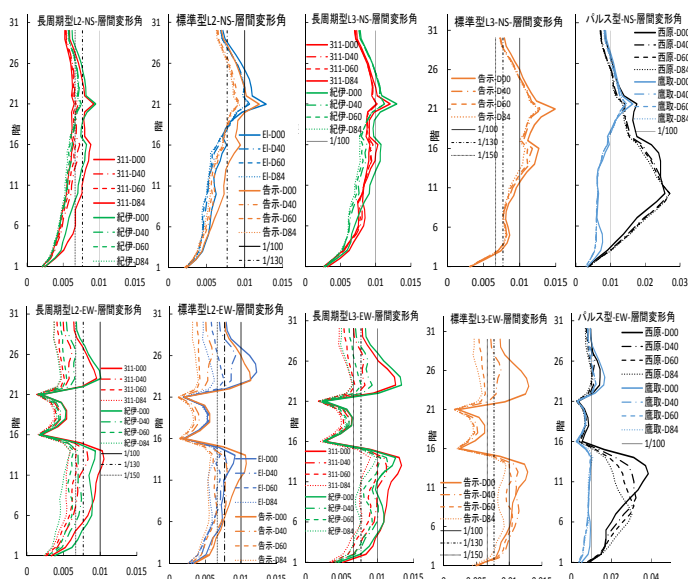


図 11 L2, L3 地震動に対する応答層間変形角

定する。柱脚鉄骨置屋根とコンクリート下部構造の間には高さの差が生じるので、支承部に作用する水平力は必ず偏芯を伴う。従って支承部周辺は水平力によるせん断力と、水平力と偏芯によるモーメントを負担しなければならない。2016 年度の実験は、屋根構造側が剛で偏芯モーメントが負担でき、アンカーボルト側がピンとみなせる（図 12）。このような支承部のモデル試験体を製作し、屋根自重を模した一定の鉛直荷重と、地震荷重を模した繰返し水平荷重を載荷する実験を実施し、その非線形復元力特性を近似する定式化を実施した。実験は以下 2 種類を実施する。

- ① モルタルとベースプレート間の実際の摩擦係数を知るための摩擦実験
- ② アンカーボルト大変形時の復元力特性を知るための破壊実験

破壊実験では、鉛直荷重 200kN を加える場合と加えない場合の 2 種類の実験を実施する。

2) 実験装置と試験体

図 13 に実験装置の全容を示す。上方のスライダーを設置したジャッキで一定の鉛直荷重を与えつつ、水平加力ジャッキでベースプレートに繰返し強制変位を与える。ベースプレートは下部構造を模したコンクリートボックスに埋め込まれた 4 本の M20 のアンカーボルト（表 3）で固定される。ベースプレートとコンクリートの間には実際と同様にベースモルタルが充填されるが、今回の実験ではその高さを、標準的な 50mm と地震被害が顕著な厚いモルタルを再現した 100mm の 2 種類とした。また破壊実験では $\phi 25$ の穴の開いたベースプレートを使用し、摩擦実験ではアンカーボルトがベースプレートに接触しないように大きなルーズホールを開いたものを使用した（図 14）。ベースプレートそのものの変形を避けるため板厚は 40mm とした。ベースプレートを載せる前のモルタル表面の状態を図 15 に示す。モルタル打設時には表面を可能な限り平滑にした。

3) 実験結果

摩擦実験では、モルタル高さ 50mm, 100mm の各試験体に一定の鉛直荷重 25kN、50kN を加えつつ繰返し水平荷重を加える計 4 回の試験を実施した。荷重変形曲線を図 16 に示す。いずれの試験体の摩擦係数も概ね 0.5（全試験体平均値は 0.47）となり、建築学会接合部設計指針²⁸⁾の安全限界用摩擦係数(0.5)とほぼ一致した。

鉛直荷重を加えない破壊実験の荷重変形曲線を図

17 に示す。横軸はベースプレートの水平変位 δ_{BH} とモ

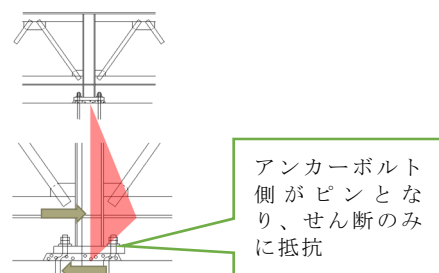


図 12 地震力の偏芯によるモーメント分布

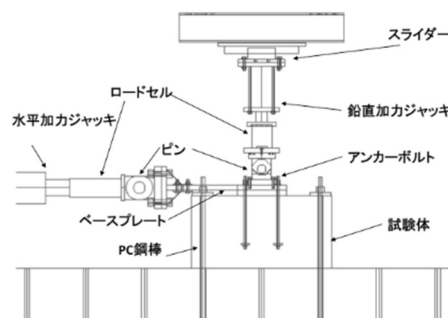


図 13 実験装置全容

表 3 アンカーボルトの機械的性質

規格	JIS G 1220
種類の記号	ABR400
ネジの呼び×ボルト長さ×ネジ長さ	M20×620×80×80
降伏点 N/mm^2	328
引張強さ N/mm^2	455
降伏比%	72
伸び%	31

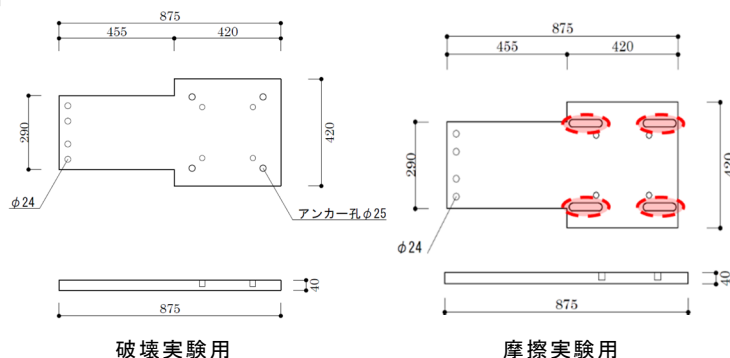


図 14 ベースプレート

ルタル層の初期高さ h より算定するモルタル層のせん断変形角 γ である。

$$\gamma = \tan^{-1}(\delta_{BH}/h) \quad (1)$$

学会指針²⁷⁾では、モルタルとの摩擦がなく支承部の水平抵抗要素がアンカーボルトのみとなる場合、式(2a,b)のせん断耐力式で支承の降伏耐力 Q_y 、最大耐力 Q_u を評価する。

$$Q_y = n \cdot q_{by}, \quad q_{by} = A_b \sigma_y / \sqrt{3} \quad (2a)$$

$$Q_u = n \cdot q_{bu}, \quad q_{bu} = A_b \sigma_u / \sqrt{3} \quad (2b)$$

Q_y と Q_u を図中に水平線でプロットし、荷重変形曲線と交差する点の変形を見る。 Q_y と最初に交差するのは $\gamma \approx 0.7$ （モルタル厚 50mm）、 $\gamma \approx 0.4$ （モルタル厚 100mm）である。降伏耐力は通常損傷限界として用いられるが、いずれもアンカーボルトの顕著な塑性変形とモルタルの亀裂が生じた後(図 18)であり、損傷限界にはほど遠い状態である。また最大耐力に到達するのはモルタル厚 50mm 試験体の正側のみであった。このように鉛直荷重が小さい場合、学会指針の設計式では試験体の水平耐力を大幅に危険側に評価する。

鉛直荷重を 200kN とした破壊実験における荷重変形曲線を図 19 に示す。モルタル厚さ 50mm 試験体ではモルタルは粉砕されるが(図 20) 鉛直荷重は最後まで減少せず、荷重支持能力は維持された。この時アンカーボルトの抵抗にベースプレートとモルタル間の摩擦が加わるため、アンカーボルトのみの場合と比べると耐力が格段に上昇した。しかしながらモルタル厚さ 100mm の試験体では、 $\gamma=0.2$ を越える付近からモルタル層の崩壊が顕著になり(図 21)、鉛直荷重を支持できなくなったため摩擦力が急激に低下し、水平耐力も上昇しなかった。

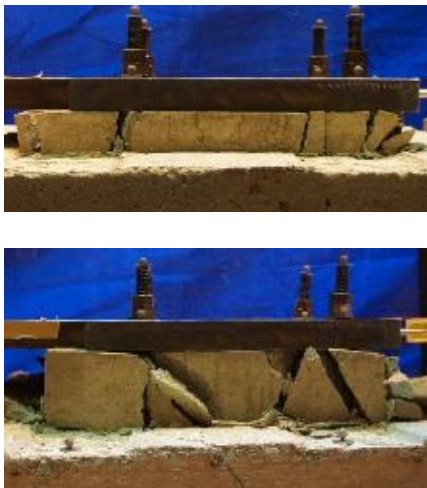


図 18 降伏せん断耐力 Q_y 到達時の状態（鉛直荷重なし）



図 15 モルタルの表面

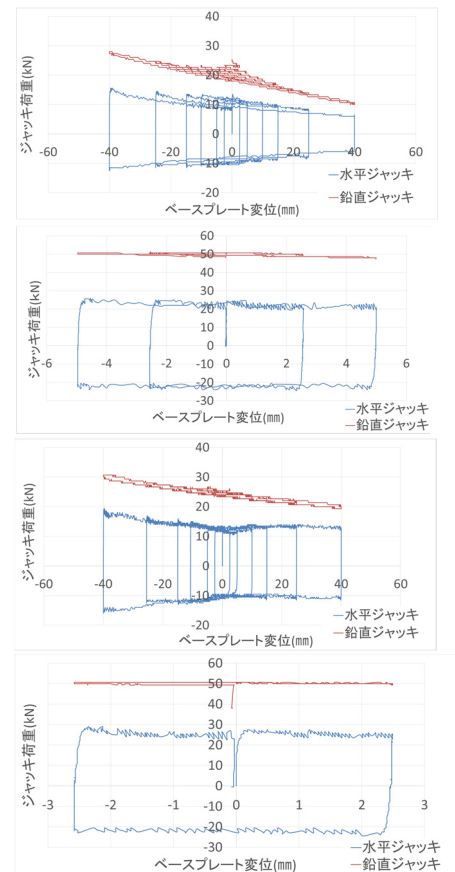


図 16 摩擦実験における荷重変形曲線

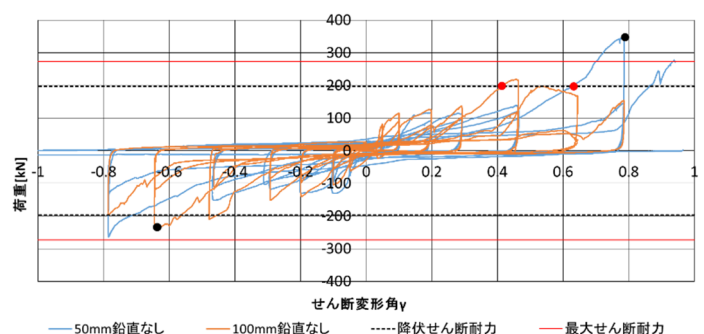


図 17 破壊実験における荷重変形曲線（鉛直荷重なし）

上記のアンカーボルト耐力に摩擦力 $F=\mu P_v$ を足し合

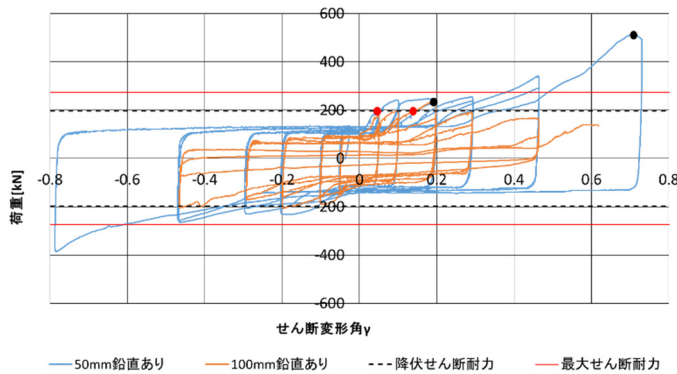


図 19 破壊実験における荷重変形曲線（鉛直荷重あり）



図 20 厚さ 50mm 最大耐力時の状態（鉛直荷重あり）

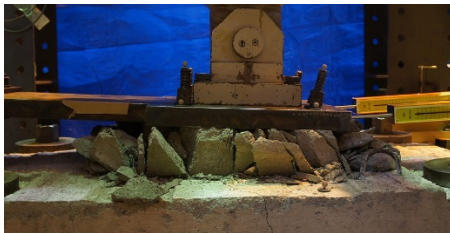


図 21 厚さ 100mm モルタルの崩壊（鉛直荷重あり）

4) 復元力特性のモデル化

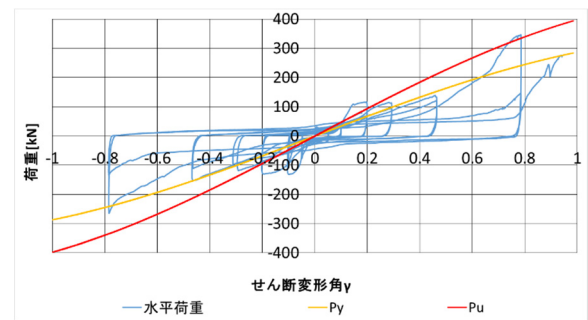
前述したようにアンカーボルトのせん断降伏を仮定すると危険側に耐力を算定することになるため、より実情に即したモデルとして、軸降伏型モデルを提案している²⁹⁾。水平荷重とアンカーボルト軸力の水平成分が釣り合うと仮定すると（図 22）、降伏耐力 P_y 、最大耐力 P_u は γ の関数として

$$P_y = n \cdot N_{by} \sin \gamma, \quad N_{by} = A_b \sigma_y \quad (3a)$$

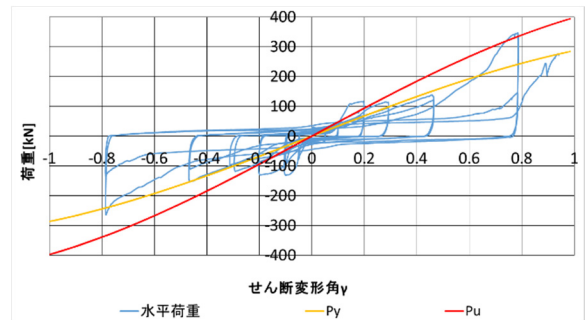
$$P_u = n \cdot N_{bu} \sin \gamma, \quad N_{bu} = A_b \sigma_u \quad (3b)$$

式(3a,b)を鉛直荷重なしの実験結果と比較する（図 23）。 γ の大きな領域では P_y がよく実験結果を近似している。小変形領域においては実験結果の方が大幅に高く、軸降伏とは別のメカニズムを考える必要があるがこれは今後の課題である。

鉛直荷重 P_v がある場合、摩擦係数を $\mu=0.5$ として、

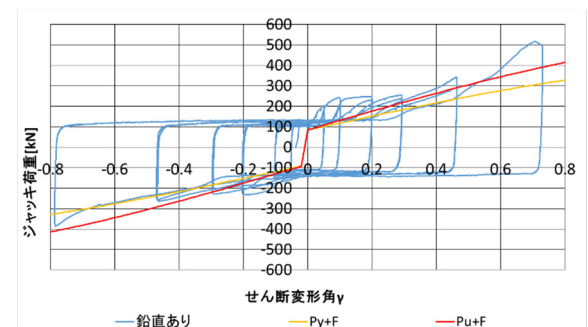


モルタル厚 50mm

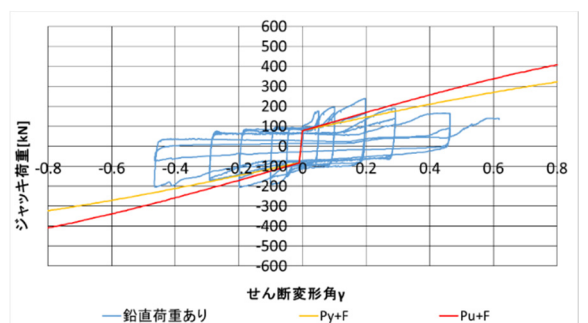


モルタル厚 100mm

図 23 式 (3a, b) と実験結果の比較



モルタル厚 50mm



モルタル厚 100mm

図 24 摩擦を加えた算定式と実験結果の比較

合わせる。 $P_v=200\text{kN}$ として実験結果との比較を図 24 に示す。モルタル厚さ 50mm の試験体ではよく実験結果を近似できているが、モルタル厚さ 100mm の試験体では、モルタルの粉砕による鉛直荷重支持能力の喪失で大変形域の耐力は実験値が低い。モルタルの摩擦力

を無視して耐力を評価すれば一応安全側である。

3. おわりに

ここでは、

1) UDM の成果を踏まえ、当事業テーマ 2 の背景と研究目標、課題を概観した。

2) 2016 年度の研究成果を紹介した。

2017 年度は以下の研究を予定している。

1) 高層ビルの研究においては応答解析の精度を向上するとともに、梁端部の低サイクル疲労破断の検討を実施する。

2) 体育館の研究においては、スライド機構を有する置屋根支承部の実験と、置屋根構造の応答特性を知るための 3 次元モデルによる解析を実施する。また地震後の状態より損傷を推定する方法を検討する。

3) 非構造材の研究においては、大加速度振動台の導入と整備を行う。

謝辞

2016 年度研究の一部には、工学院大学プロジェクト研究の支援を受けた。

参考文献

- 1) 東京都財政局：構造設計指針、2016.1
- 2) 国土交通省他：2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書、2015.6
- 3) 文部科学省大臣官房文教施設企画部：屋内運動場等の耐震性能診断基準（平成 18 年版）（平成 22 年 10 月一部変更）、2010.12
- 4) 日本建築防災協会：2011 年改訂版 耐震改修促進法のための既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説、2011.9
- 5) 星幸男、久田嘉章、山下哲郎、鱒沢曜、島村賢太：超高層建築における常時微動・人力加振・地震観測記録と 3 次元立体解析結果の比較検討による振動性状評価に関する研究、日本地震工学会論文集、Vol.10 No.2 pp.73-88, 2010.5
- 6) 山下哲郎、久田嘉章、坂本有奈利、久保智弘：新宿区超高層街区に建つ鉄骨造超高層建築の東北地方太平洋沖地震前後の振動特性、日本地震工学会論文集 特集号「2011 年東日本大震災」その 1, Vol.12 No.4 pp.14-26, 2012.9
- 7) Y.Hisada, K.Kasai, T.Yamashita, D.S.Du, E.Pu, K.Shirasaki, H.Aoki, M.Nakanishi : Damage Prediction and Retrofit Plan Using Dampers for a High-Rise Steel Building in Tokyo Based on Its Response Records, 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago Chile, 2017.1
- 8) 小泉秀斗、坂本有奈利、久田嘉章、山下哲郎：振動台実験によるシステム天井シングルライン工法の力学特性および損傷評価に関する研究、日本地震工学会論文集、Vol.14 No.2 pp.144-163, 2014.5
- 9) 森大、元結正次郎、佐藤恭章、山下哲郎、中西規夫、末岡利之：ラインタイプシステム天井の動的実験概要と損傷状況 ラインタイプシステム天井の動的性状に関する検討 その 1、2014 年度日本建築学会大会(近畿)学術講演会・建築デザイン発表会、天井：振動台実験、構造 I, pp.973-974、2014.9
- 10) 森大、元結正次郎、山下哲郎、石原 直：動的要素実験の概要および再現解析モデルの提案：地震時における鋼製下地在来工法天井と設備機器の相互作用に関する研究 その 2、日本建築学会大会(関東)学術講演会、構造 I、pp.881-882、2015.9
- 11) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告 建築編 3、鉄骨造建築物、シェル・空間構造、2014.9
- 12) 国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人建築研究所：平成 28 年（2016 年）熊本地震建築物被害調査報告（速報）、国総研資料 No.929 号、建築研究資料 No.173 号、2016.9
- 13) 米田良祐、山下哲郎：鉄骨造学校体育館の桁行方向ブレース構造の弾塑性応答変形推定、日本建築学会技術報告集、No.42、pp.501-506, 2013.6
- 14) 白鳥和希、実験概要とスライド支承の実験結果鉄骨置屋根支承部の地震時破壊挙動と耐力に関する研究（その 1）、日本建築学会技術報告集、Vol.21、No.49、pp.1001-1005, 2015.10
- 15) 山下哲郎、白鳥和希：半剛支承の破壊挙動と耐力評価 鉄骨置屋根支承部の地震時破壊挙動と耐力に関する研究（その 2）、日本建築学会技術報告集、Vol.22 No.50 pp.47-52, 2016.2
- 16) Tetsuo Yamashita, Naoki Wada: Mobility of conventional slide bearings supporting steel roofs, IASS Symposium 2016, Tokyo, Program & Short Abstracts, Spatial Structures in the 21st Century (9 page full paper in USB), p.43, 2016.9
- 17) 日本建築学会：ラチスシェル屋根構造設計指針、2016.11
- 18) 日本建設技術高度化機構鉄骨置屋根構造耐震研究編集委員会：鉄骨置屋根構造の耐震診断・改修の考え方、技報堂出版、2015.9
- 19) 鈴木芳隆、吹田啓一郎ほか：18 層鉄骨造高層建物の南海トラフ予測地震動による振動台実験と解析、巨大海溝型地震・内陸地震に対する鋼構造の取り組み、2015 年度日本建築学会大会（関東）PD 資料、pp.33-44、2015.9
- 20) 日本建築センター、日本鉄鋼連盟：鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説、2003.9
- 21) 青木花子・山下哲郎・白崎和幸・笠井和彦・杜升・久田嘉章、長周期地震動等を考慮した既存超高層建築の耐震性能とダンパー補強効果の評価 その 3 梁端の破断状況の試算、2016 年度日本建築学会大会（九州）（学術講演梗概集 B-2 pp.89-90）、2016.8
- 22) 長谷川隆、成原弘之、安田聡：多数回繰返し載荷を受ける梁端部の塑性変形能力と超高層鉄骨造建物の耐震安全性の検証、巨大海溝型地震・内陸地震に対する鋼構造の取り組み、2015 年度日本建築学会大会（関東）PD 資料、pp.19-32、2015.9
- 23) 吉谷貴寛、山下哲郎、久田嘉章：首都圏で予測さ

れる強震動を受ける既存超高層の H 形鋼ブレース
の弾塑性座屈解析、第 14 回日本地震工学シンポジ
ウム（2014）論文集、pp.751-756

- 24) 竹内徹、中村悠、松井良太：接合部固定度を考慮
した H 形断面ブレースの座屈後履歴性状及び累積
変形性能、日本建築学会構造系論文集 No.653、
pp.1289-1296、2010.7
- 25) Ryo Iwasawa, Tetsuo Yamashita, Shungo Manjo: Study
on accumulated deflection due to plastic deformation
steel moment frames of gymnasiums, IASS Symposium
2016, Tokyo, Program & Short Abstracts, Spatial
Structures in the 21st Century (8 page full paper in USB),
p.61, 2016.9
- 26) 日本建築学会：天井等非構造材の落下に対する安
全対策指針・同解説、2015.1
- 27) 笠井和彦、岩崎啓介：様々な形式の制振構造にお
ける自由度縮約法と水平バネ系への変換法、日本建
築学会構造系論文集 No.605、pp.37-46、2006.7
- 28) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針、2012.7
- 29) Naoki Wada, Tetsuo Yamashita : Experimental study on
inelastic response of bearings supporting steel roofs for
cyclic loading, IASS Symposium 2016, Tokyo, Program
& Short Abstracts, Spatial Structures in the 21st Century
(8 page full paper in USB), p.110, 2016.9

レジリエンスな社会構築のための 地震動評価と建築の被害低減策

地震の長期評価、南海トラフ地震、長周期地震動、設計用地震動

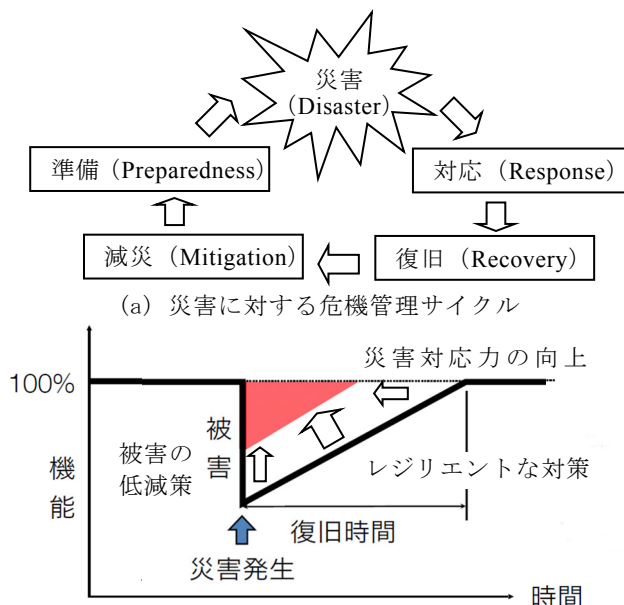
久田嘉章*

1. はじめに

災害に強く、被災後の速やかな復旧を可能とするレジリエンスな社会構築には、図 1(a)に示すような災害に対する 4 つのフェーズの危機管理サイクルが必要であり、特に図 1(b)に示すように被害を低減する従来型のハード中心の対策だけでなく、被害が出ることを前提とする対応力向上によるソフト的な対策を融合した策の推進が求められている¹⁾。最も有効な対応力向上策として、どんな種類・規模の災害にも柔軟な対応できるオールハザードアプローチによる対応計画とマネジメントの必要性が指摘されている^{2),3)}。建築・土木分野でも、従来の火災・震災・水害など災害別の被害想定によるハード対策を中心として被害の低減を進める対策だけでなく、複合災害を含む想定外の災害は必ず起こることを前提としたオールハザードアプローチによる柔軟な対応力向上策が必要であり、その社会的な要望に応えられる人材の育成が求められている。特に東日本大震災を契機に、我が国では想定外を無くすことを目的として、最大級の災害を想定した対策⁴⁾が推進されているが、中小規模の災害と最大級の災害とはその対応は大きく異なり、過大な被害想定により費用対効果を度外視した過剰な投資が行われたり、可能性の高い中小災害に有効な対策を諦めてしまうような事態は避けなければならない⁵⁾。

本報は上記の背景を鑑み、まず南海トラフ巨大地震を例として正確な地震や被害の予測は困難であり、中小から最大級災害まで柔軟な対応が必要とされる現状を確認する。次に、著者が関係した建築分野を中心とした取り組み事例を紹介し、レジリエンスな社会構築のための被害の低減策に関する現状と課題を整理する。

（本報告は、「レジリエンスな社会構築のための被害低減策と対応力向上策の現状と事例報告（久田嘉章、土木学会論文集 F6（安全問題）、Vol. 72（2016）No. 2 p. I_1-I_14）」の前半部を再構成している）



(b) レジリエンスな災害対策の概念図（文献¹⁾に加筆）

図1 危機管理サイクルとレジリエンスな災害対策の概念図

2. 地震の長期評価と被害想定の実状

災害対策の第一歩は被害想定によるハザード・リスク評価であるが、2011 年東日本大震災を契機として、地震の規模や場所・発生確率の評価（長期評価）と被害の正確な予測は困難であることが明らかになっている。ここでは南海トラフ地震を例として、長期評価や被害想定の実状と、多様な地震や被害想定の評価が必要となっている現状を紹介したい（首都直下地震の事例は文献⁵⁾を参照されたい）。

(1) 南海トラフ巨大地震による長期評価の実状

2011 年東北地方太平洋沖地震以前は、図 2 と図 3（左）の南海トラフ沿いの巨大地震（東海・東南海・南海の単独型および連動型地震）の例に示すように、海溝型巨大地震の発生場所と規模、発生時期にはある程度の規則性（固有地震モデル）があり、比較的予測しやすいと考えられていた⁸⁾。しかしながら、全くの想定外であった超巨大地震（M9 地震）の発生を踏まえ、固有地震モデルの概念は大きく揺らぎ、

* : 工学院大学建築学部まちづくり学科

地震の長期評価に多様性（不確かさ）を考慮せざる負えなくなった。その結果、図 3（右）に示すように、南海トラフ地震の評価には科学的根拠が明確でない最大級の M9 地震を加え、「M8～9 クラスの地震の今後 30 年発生確率は 60～70%」と評価されている⁹⁾。一言でいえば、長期評価の困難さが明らかとなり、科学（Science）というよりも、防災を目的とする専門家判断（Expert Judgment）による評価結果を公表せざるを得ない状況となっている。

地震予測が困難であることは図 4 から容易に理解できる¹⁰⁾。すなわち、図は日本列島の海域を含む活断層帯であるが、極めて複雑な構造であり、南海トラフに関しても図 2 や図 3 のような単純なプレート境界は存在しない。駿河・相模トラフでは、フィリピン海上の伊豆半島がユーラシアプレートと衝突し、本来は海域に存在したプレート境界が内陸に入り込み、非常に複雑な断層面や応力状態となっている。加えて南海トラフ上には数多くの分岐断層等が分布し、各断層面の形状や応力の初期条件は不明である。従って、次の地震がどこにどの程度の規模で生じるかを物理的に予測することは不可能である。実際、南海トラフにおける過去の地震の解釈も学術的に諸説あり、図 2 のように単純ではない。例えば 1496 年明応地震は図-2 では駿河トラフの東海・東南海地震と解釈されているが、近年では図-4 の駿河トラフの南に位置する銭州断層帯の地震であり、さらには、ここにマイクロプレートがあり新しいプレー

ト境界になりつつある、次の東海地震はこの断層帯で生じる、などの様々な学説^{11), 12)}がある。従って、図 2 や図 3 の単純化された南海トラフ地震のモデルは、厳密な科学的検証の結果というよりも、やはり防災目的の専門家判断である。

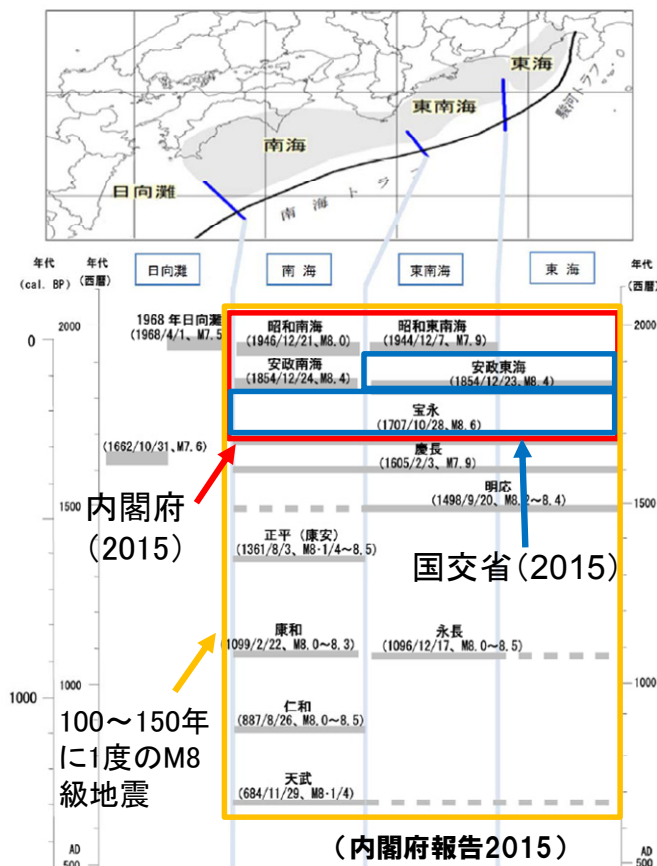


図 2 歴史上の南海トラフの巨大地震の発生履歴^{6), 7)}

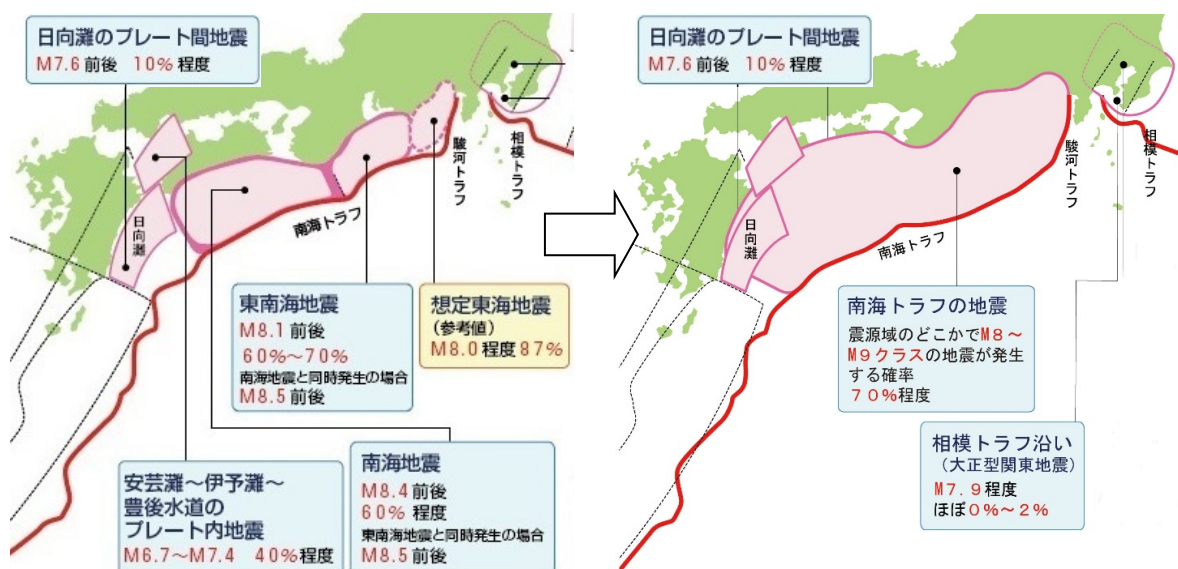


図 3 311 地震の結果を受けて「良く分からないことが分かった」南海トラフ巨大地震
(左: 311 地震前の固有地震説による長期評価⁸⁾, 右: 311 地震後の多様性を考慮した長期評価⁹⁾)

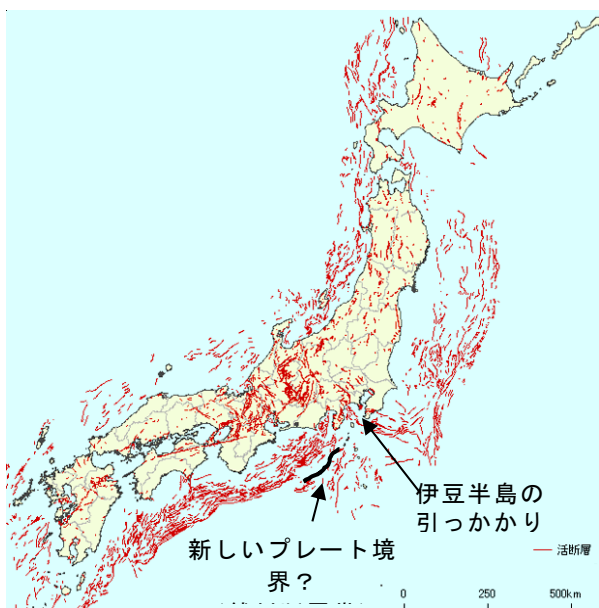


図 4 日本列島周辺の複雑な活断層帯分布（文献に加筆¹⁰⁾）

(2) 南海トラフ巨大地震による被害想定現状

国や都道府県など公的機関からは発表される想定地震動や震度分布や被害想定も、科学と言うよりも防災対策上の判断であり、防災対策を進めるうえで注意を要する。例えば、内閣府による南海トラフ巨大地震の想定震度分布として、図 5（上）は想定東海地震¹³⁾、図 5（下）は、最大級の南海トラフ地震の想定震度⁴⁾であり、静岡県ほぼ全域で、M8 地震の前者では震度 6 弱以上、M9 地震の後者では震度 6 強以上と評価されている。一方、図 6 は 1864 年安政東海地震（実際には東海・東南海地震の連動地震であり、M8.4 の超巨大地震をされている）における静岡県天竜川流域の寺院建築の倒潰率から求めた震度分布である¹⁴⁾。図 6 は図 5 の四角枠内に相当する天竜川流域であるが、図 5 では全域で震度 6 強以上であるのに対して、図 6 では殆どの地域で震度 5 以下で、ごく一部の地域で震度 6 以上に過ぎない。

地震動はランダムな現象であり、震源・伝播・サイト特性、さらには建物の耐震性や地震動との共振の有無などから、震度や被害分布は本質的に大きなばらつきを生じる⁵⁾。従って、図 5 の想定結果のように広大な地域で一様な震度分布となることは科学的にはあり得ない。しかしながら低震度の地域の公開には防災対策の推進上問題があるため、多数の推定結果（地震動計算において、パラメータや乱数を変化させる等）を重ねて、できるだけ一様な分布、かつ安全側（大きめ）となる結果が公開されている。

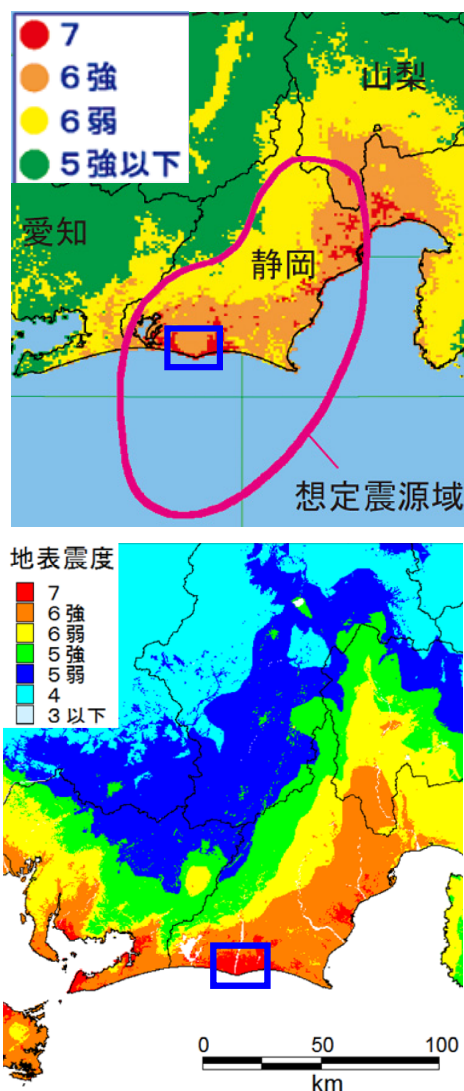


図 5 想定東海地震（M8.0）の推定震度分布¹³⁾と、想定南海トラフ巨大地震（M9.1）の推定震度

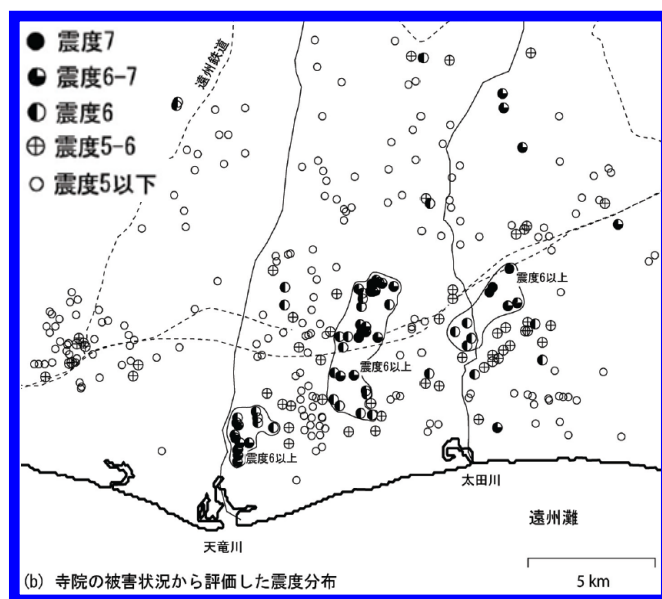


図 6 1864 年安政東海・東南海地震（M8.4）による静岡県天竜川流域の震度分布¹⁴⁾

3. 最大級地震と設計用地震動の現状と策定例

地震・地震動の正確な予測は困難であり、耐震設計の分野でも様々な地震動レベルに応じた対策が必要となっている。特に、最近では活断層帯の地震や超巨大地震など、可能性は極めて低い、大きな振幅レベルの最大級地震動への対応が求められている。ここでは、主として建築分野において、南海トラフ巨大地震を事例とした設計用地震動の策定例、レベル別の設計用・検証用地震動の国内外の事例、および、耐震対策の現状を紹介したい。

(1) 建築分野における設計用・検証用地震動

現在、日本の超高層建築や免震建築などの耐震設計の設計用地震動では、発生確率と地震動レベルの点から、稀に発生する地震動（数十年に 1 度程度のレベル 1 地震動、または L1 地震動）と、極めて稀に発生する地震動（数百年に 1 度程度のレベル 2 地震動、または L2 地震動）が設定されている（平成 12 年建設省告示 1461 号）。一方、法規制の枠を超えて、活断層帯の地震である 1995 年兵庫県南部地震などを契機として、数千年に 1 度程度という極めて低頻度の活断層や超巨大地震による最大級の地震動を、検証用地震動（レベル 3 地震動、または L3 地震動）として利用する場合がある。この地震動は耐震設計を行うための設計用地震動（L1・L2 地震動）とは区別し、一般に、設計用地震動で耐震設計した建物の耐震性余裕度や最悪の事態を防止するための検討用の地震動として用いられる。

(2) 南海トラフ巨大地震と設計用地震動の策定例

南海トラフ巨大地震の長周期地震動対策への社会的要請を受け、2005 年に内閣府は報告⁶⁾（以下、内閣府報告）を、国土交通省は対策案⁷⁾（以下、国交省対策）を公表し、2016 年より「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策」として実施に移している。特に対策は報告をもとに、図 7 に示す大阪湾岸地域（OS1）や中部圏湾岸地域（CH1）等の地域では現行の建築基準法・告示の耐震設計基準（極稀地震動、L2 地震動）の振幅レベルを 2 倍にまで増加させている。国交省対策は、建築基準法の告示ではないとされているが、国による指導として実質的には強制力を伴うと考えられている。

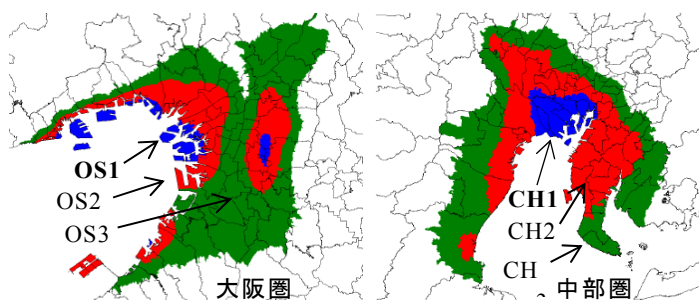


図 7 国交省対策案 2)における大阪圏（左）と中部圏（右）におけるゾーニング⁷⁾

建築基準法はその第一条にあるように、公共の福祉に資する最低限の基準を定める法律であり、国交省の指導もこれを基準として行われる。従って、民間の建築物を対象として設計用の基準レベルを 2 倍にするという国の指導に関しては、以下 a)～c)に示す様々な検討課題があり、よりオープンな議論が必要と考えられる^{15), 16)}。

a) 国交省対策は、内閣府報告をもとに策定しているが、そもそも両者の基本スタンスは大きく違うはずである。内閣府報告は想定外であった東日本大震災の教訓から、最大級に近い地震による地震動の上限値に近い推定値を提示し、防災対策の推進を目的としている。一方、国交省対策は最低基準の建築基準法に基づく極稀地震動（L2 地震動）として、大地震時の地震動の下限値の提示が求められている。言わば前者は専門家判断による危険性（リスク）を強調するのに対し、後者はリスクとリターンの両面から、公共の福祉と民間活動の健全な発展とのバランスによる最低基準を提示すべきと考えられる。

b) 国交省対策は「南海トラフ沿いで約 100～150 年の間隔で発生する M8～9 クラスの巨大地震による地震動が対象」とされているが、設計用の L2 地震動としている地震が、1707 年宝永地震（M8.6）と 1854 年安政東海地震（東海・東南海連動地震、M8.4）である。図-2 に示されているように両地震は約 1500 年間の歴史上で明確には 1 度しか確認されていない巨大地震であり、「約 100～150 年の間隔」という標準的な大地震の L2 地震というより、千年に 1 度程度の巨大地震である L3 地震という解釈も可能である¹⁵⁾。

c) 免震建築を対象とした試算では、従来の 2 倍の入力を設計用地震動として従来の設計クライテリアを満足させようとすると、非常に多くのダンパー等

が必要となり，L1 地震動での応答加速度が増大し，可能性の高い地震に対する耐震性能が悪化してしまう．可能性の極めて低い超巨大地震に対して民間建築に膨大な投資を求め，可能性の高い中小地震で性能を劣化させる合理的な理由が見いだせない¹⁶⁾．

上記の課題を背景に，南海トラフ巨大地震による約 100～150 年に 1 度という L2 レベルの長周期地震動を 2 つの方法で試算を紹介する¹⁵⁾．

まず始めの方法は，内閣府報告の結果⁶⁾を利用する方法である．すなわち，内閣府報告には図 2 の 5 つの歴史地震を対象に，図 8 に示すような疑似速度応答スペクトル（減衰 5% の pSV）が周期ごとに示されている．1707 年宝永地震の大阪・中部圏湾岸地域の応答値は現行の告示 L2 地震動レベル（80 kine）を超えているが，1946 年昭和南海地震では，その半分以上の値である．これらの値を図 2 の全ての南海トラフ沿いの歴史地震に適用し，その平均的な pSV を求めた．表 1 と図 10 に，報告の計算結果を用いた OS1・CH1 における周期 2～6 秒の pSV の結果を示す．試算では地震規模が不確定な地震（図-2 の点線の領域）はできるだけ大きな地震と仮定したが，単独の南海地震の回数が多いため，pSV の平均値は両地点でも 60～130 kine 程度の値である¹⁵⁾．

一方，もう一つの手法は，国交省対策⁷⁾として国交省の基準整備で提示された方法¹⁷⁾（以下，基盤整備の方法）である．文献¹⁷⁾と同様に，図 9 に示す南海トラフの 5 つの M8 級地震と，それを全て合成した宝永型地震（Mw8.7）による速度応答スペクトルを求めた．ここで注意すべきことは，基準整備の方法は経験式であり，設計基準に用いるには長期的な安定性に欠けることである．すなわち，この経験式は現在までわずか約 20 年間の限定的な K-NET の観測データを基礎にしており，小地震が中心，巨大地震の

震源近傍データの欠落，旧 K-Net による短い継続時間，深層地盤の増幅率の妥当性が未検証などの様々な制約がある 1 つの実験式である．従って，今後，新しい観測データや知見により容易に変更される可能性があることに注意が必要である．

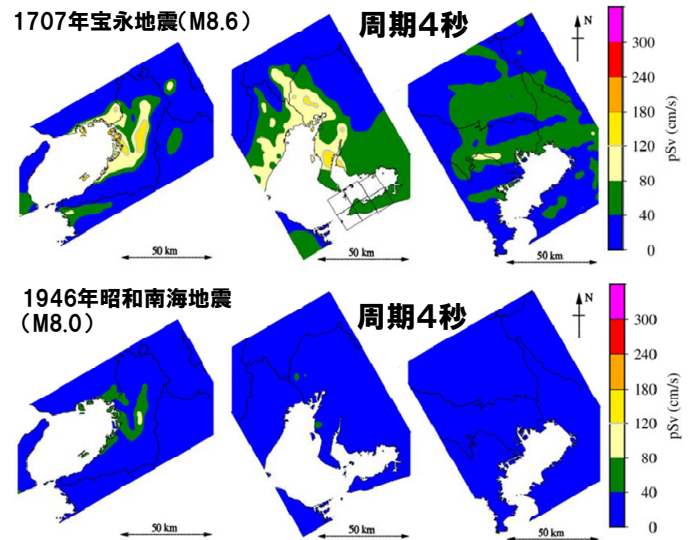


図 8 内閣府による南海トラフ巨大地震による 3 大都市圏の疑似速度応答スペクトルの例（減衰 5%，周期 4 秒の例）

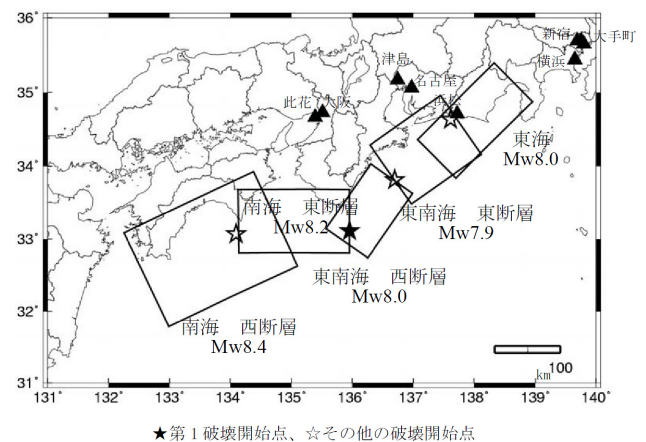


図 9 南海トラフ巨大地震の震源モデル例（5 つの震源断層モデルを重ねると M8.7 の宝永地震

表 1 内閣府報告⁶⁾による南海トラフ沿いの巨大地震による疑似速度応答スペクトル（左：OS1，右：CH1）¹⁵⁾
注：対象とする歴史地震は図 2 より選定．その際，日向灘沖地震と慶長地震は除外（後者は津波地震）また M の値に幅がある場合や震源域が明確でない場合は，できるだけ大きい方を採用

地震	回数	対象地震	OS1-此花 (pSv:cm/s)					CH1-津島 (pSv:cm/s)				
			2秒	3秒	4秒	5秒	6秒	2秒	3秒	4秒	5秒	6秒
宝永	2	宝永、天武	240	210	210	210	210	180	150	120	120	100
安政東海	3	安政東海、明応、永長	150	150	120	60	80	150	150	120	120	80
安政南海	3	安政南海、正平、仁和	80	80	100	120	120	40	40	40	30	30
昭和東南海	1	昭和東南海	150	150	120	80	80	180	150	120	120	80
昭和南海	2	昭和南海、康和	60	60	60	80	80	40	40	40	30	30
合計	11	平均	131	125	120	109	115	108	100	84	79	61
		標準偏差	63	54	47	53	48	63	55	40	45	29

図 10 は、此花（OS1）と津島（CH1）を対象に、2 つの方法で試算した pSV と、告示 L2 と国交省対策の OS1 と CH1 の pSV である¹⁵⁾。図の周期 2～6 秒のドットは内閣府報告の結果と、その平均値と標準偏差（表 1）、様々な曲線の値は基準整備の方法を図 9 の地震に適用した結果である。図より、南海トラフの M8～9 地震でも両サイトでの応答値は大きく変動している。例えば、両地域とも宝永型地震は国交省の OS1 や CH1 の値を上回っており、此花では南海域東側地震、津島では東海域西側地震の値が大きい。一方、此花では東海域東・西側地震、津島では南海域東・西側地震の値は小さく、告示 L2 以下である。全地震を考慮した平均的な地震動レベルは、告示 L2 をやや上回る程度である。従って、宝永地震等の地震動レベルは国交省対策である OS1 や CH1 に近いが、発生確率が低いため、L2 地震というよりも L3 地震と解釈可能である。やはり、宝永型地震のような超巨大地震を設計用地震動（L2 地震動）として扱いが本当に妥当かどうか、オープンな議論による社会的なコンセンサス形成のプロセスが必要だと思う。

(3) 最大級地震動・設計用地震動の事例と対策

次に、建築物の耐震設計において L3 地震動（最大級地震動、極大地震動）を考慮した具体例をいくつか紹介する。

a) 東京湾岸の高層建築等を対象とした事例¹⁸⁾

表 2 は東京湾岸の超高層建築等を対象とした L1～L3 地震動と設計用クライテリアである¹⁸⁾。L1・L2 地震動による設計クライテリアは従来の超高層建築等とほぼ同じであるが、想定したサイト波や公表さ

れている地震動の検討から 2 種の極大地震動（L3 地震動）とその耐震対策上のクライテリアが示されている。すなわち、レベル 3-S は首都直下地震や活断層帯の地震のような震源近傍の強震動を想定した地震動、レベル 3-L は南海トラフや相模トラフの海溝型超巨大地震の長周期・長時間地震動を想定したレベル 3-L であり、前者では告示波の L2 の 1.5 倍の振幅を、後者では同 L2 地震の周期 4 秒以上を 1.5 倍の振幅と十分に長い継続時間を設定し、崩壊・倒壊しないことを確認するとしている。この成果は、現在の東京都の湾岸施設の耐震設計指針¹⁹⁾に活用されている。

b) 米国の最大級地震動と設計用地震動^{20), 21)}

最大級地震動を考慮した耐震設計法の海外の事例として、図 11 は米国の 2003 NEHRP Recommended Provisions による耐震性能表²⁰⁾である。米国ではカリフォルニア州以外は、非常に低頻度の地震が主であるため、基準とする最大級地震（MCE; Maximum Considered Earthquakes）は約 2500 年に一度の地震（50 年超過確率が 2%）の地震動としている。一方、構造物の耐震設計用の地震動は、MCE による地震動を工学的判断で 2/3 に低減させている。この値は世界標準とされる約 450 年に一度程度（50 年超過確率が 10% 程度に相当）の地震動にほぼ相当する。図 11 にあるように建物の用途・重要度（SUG I～III）に応じ、推薦されている設計クライテリアは異なり、通常の建物（SUG I）でも MCE に対して倒壊の防止が求められている。

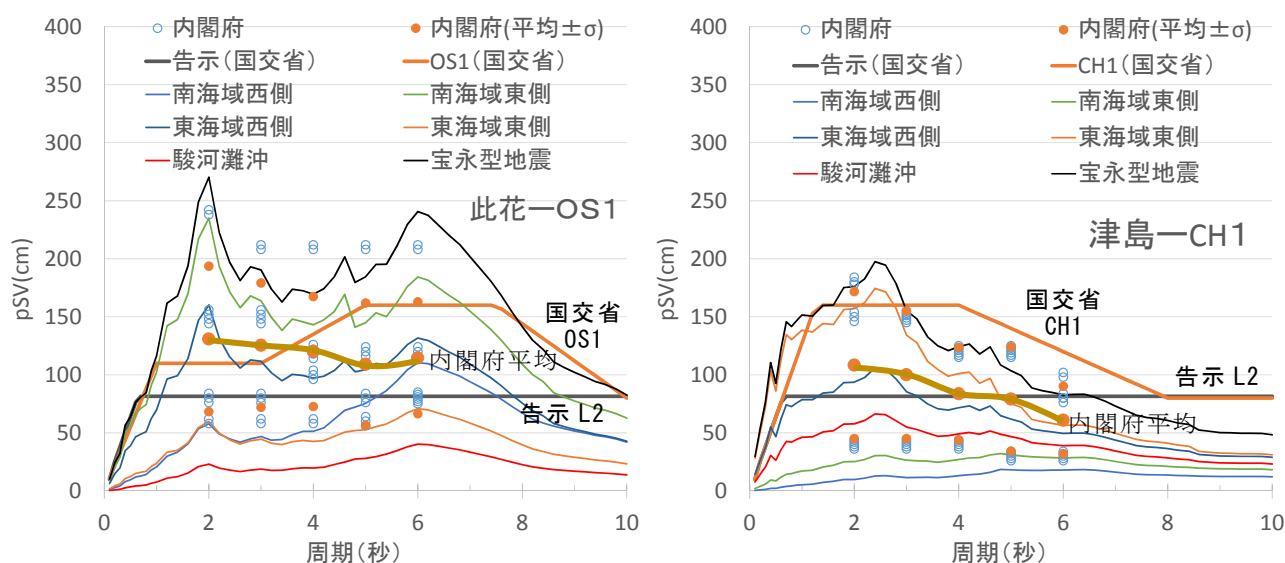


図 10 内閣府報告⁶⁾と国交省対策⁷⁾による南海トラフ巨大地震による疑似速度応答スペクトル（左：OS1，右：CH1）¹⁵⁾

表 2 東京湾岸の超高層建築等を対象としたレベル 1～3 地震動と設計用クライテリア¹⁸⁾

	入力地震動	構造物の性能	設計クライテリア		想定する地震動の発生頻度	備 考
			構造体	層間変形角		
中地震 (レベル1)	既往波 (25cm/s)	無被害 【機能維持】	短期許容 応力度以内	1/200以内	数十年に 一度発生	EL Centro, Taft, 八戸波
	告示波(稀) (Level 1)					実地震位相2波, ランダム位相
大地震 (レベル2)	既往波 (50cm/s)	軽微な補修により 事業継続可能 【指定機能維持】	部材塑性率 < 4.0	1/100以内	数百年に 一度発生	EL Centro, Taft, 八戸波
	告示波(極稀) (Level 2)					実地震位相2波, ランダム位相1波
	サイト波 (個別)					南海トラフ地震, 大正関東地震, 東京湾北部地震の計3地震
	サイト波 (個別波をほぼ包絡)					断層モデルに基づく地震動の位相 を反映して作成
極大地震 (レベル3)	告示波(極まれ)の 1.5倍(Level 3-s)	崩壊・倒壊しないことを確認 【余裕度の検証】			数千年に 一度発生	サイト波の+αレベルや, 他機関 から公開された地震動予測スペクトル 等に基づき設定
	告示スペクトル(極まれ) の4秒以上を かさ上げ(Level 3-L)				—	最新の知見を反映し, 十分に長い 継続時間を設定する

一方, 最新の基準地震動²¹⁾では, ハザード評価である MCE (地震) から建物の被害率関数を用いたリスク評価 (倒壊率) である MCER (Risk-Targeted MCE) が用いられている。基準値は倒壊の 50 年超過確率が 1%(約 5000 年に一度の発生確率)に設定されている。ハザードからリスク評価に変更したため, 他の災害・事故・病気等のリスク評価値と直接の比較検討が可能となっている。

c) 最大級地震動を考慮した免震建築の対策例

設計用地震動 (L1・L2 地震動) を凌駕する検証用地震動 (L3 地震動) が示された場合, 工学的判断 (Engineering Judgement) による対策が必要になる。例として, 図 12 に設計用地震動 (L1 と L2) と検証用地震動 (L3) に対する耐震・免震の損傷度の概念図を示す。耐震建築の場合, L1 地震動から徐々に損傷度が増大するが, 免震建築では L2 地震動でもほぼ無被害になる設計が行われる。一方, サイトが海溝型超巨大地震による長周期・長時間地震動を受ける可能性がある場合, あるいは活断層の近傍であり震源近傍の強震動 (指向性パルス, フリングステップ) や地盤傾斜などの可能性がある場合などでは, 免震装置から脱落, 擁壁への衝突, あるいは最悪の場合, 階高の高い建物では転倒などの可能性がある。従って, L3 地震動を策定し, 万が一の場合の対策として, 免震ゴムの破断や擁壁への衝突, 高層免震などでは転倒に至る可能性などを検討する必要がある。

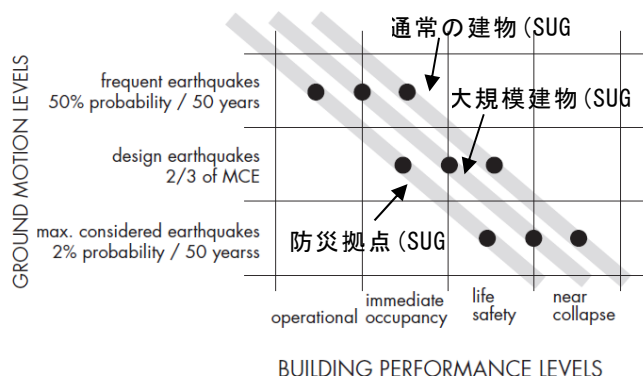


図 11 米国の 2003 NEHRP Recommended Provisions による耐震性能マトリックス²⁰⁾

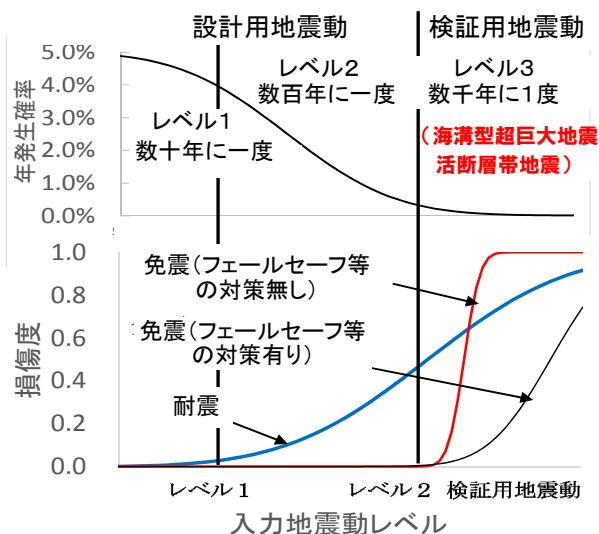


図 12 設計・検証用地震動レベル²²⁾ (地震動・策定手法は, 建設サイト・建物によって異なる)

このよう過酷事象に対して、フェールセーフ(Fail Safe：障害が発生した場合、常に安全側になるように働く機能)や、フォールトトレランス(Fault Tolerance;障害に対して多重の安全対策で耐性を高める機能)などのハード対策や、被災度を即時判定するモニタリングとクライシスマネジメントなどによるソフト対策が必要になる。例えば免震であれば、フェールセーフとして大振幅の発生を抑制するダンパーやソフトランディング機構、フォールトトレランスとして免震層の機能喪失時の耐震構造での倒壊抑制や転倒防止用ケーブルの追加などのハード対策などで、L3 地震時の安全性能は飛躍的に向上するはずである²²⁾。

L3 地震動を考慮した免震建築（25 階建て集合住宅）の事例として文献²³⁾がある。この建物では福岡市の警固断層の直上に位置するため、L3 地震動として、震源近傍の強震動（指向性パルス、フリングステップ）を考慮したシミュレーション波と告示 L2 の 2 倍の地震動を設定し、70 cm という余裕あるクリアランスで対応している。また断層運動による地盤の傾斜により、建物に転倒モーメントが生じ、免振装置に引き抜き力の可能性があるため、強い直動転がり支承を採用し、さらに免震支承が支持力を喪失した場合に備え、建物を支持するフェールセーフ基礎を導入する対策を実施している。

4. おわりに

本報は、初めに正確な地震の長期評価や被害想定
の困難さを説明し、地震や被害レベルに応じた柔軟な対策の必要性を紹介した。次に、レジリエンスな社会構築に向けた被害低減策として中小から最大級までのレベル別の地震動と建築分野での対策案を紹介し、一方、災害対応力向上策として、危機対応レベルの設定、および、新宿駅周辺地域における地域連携による取組みを、それぞれ紹介した。現在の主な内容は火災・震災対応が中心であり、今後は災害別の防災計画からオールハザードアプローチによるハード・ソフト融合による柔軟な対応への展開が必要となっている。

謝辞

南海トラフ巨大地震における長周期地震動の策定例は日本免震構造協会・入力地震動小委員会の活動成果であり、特に基準整備の方法による地震動評価は、ユニオンシステム・山崎久雄氏による計算結果を使用させて頂きました。

参考文献

- 1) 林 春男, 改めて都市災害プロジェクトが目指すもの, 第 15 回 比較防災学ワークショップ・プロシーディング, pp. 3-32, 2015.
- 2) 務台俊介, レオ ボスナー, 小池貞利, 熊丸由布治, 3・11 以後の日本の危機管理を問う, 晃洋書房, 2013.
- 3) 内閣府・災害対策標準化検討会議, 災害対策標準化検討会議報告書, 2018.
- 4) 内閣府・南海トラフの巨大地震モデル検討会, 南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告), 2013.
- 5) 久田嘉章, 震災・水害等による都市型複合災害の現状と課題, 日本地震工学会論文集, Vol. 16, No. 5 pp. 12-21, 2016.
- 6) 内閣府・南海トラフの巨大地震モデル検討会, 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告, 2015.
- 7) 国交省 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について, 2016.
- 8) 地震調査研究推進本部・地震調査委員会, 南海トラフの地震の長期評価について, 2001
- 9) 地震調査研究推進本部・地震調査委員会, 南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)について, 2013
- 10) 活断層研究会, 新編 日本の活断層 分布図と資料, 東京大学出版会, 1991
- 11) 中田 高ほか, 南海トラフ南方の銭洲断層と 1498 年明応地震, 日本地球惑星科学連合大会, S-SS35, 2013. 5.
- 12) 日置幸介, 宮崎真一, 中部日本のプレート境界と東海地震, 月刊地球 号外 41, pp. 146-150, 2003.
- 13) 内閣府・中央防災会議, 東海地震対策専門調査会(第 7 回), 資料 1: 東海地震に係る被害想定検討結果について, 2011.
- 14) 行谷佑一, 都司嘉宣, 寺院の被害記録から見た安政東海地震(1854)の静岡県内の震度分布, 歴史地震, 第 21 号, pp. 201-218, 2006.
- 15) 久田嘉章, 山崎久雄, 境 茂樹, 井川 望, 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期・長時間地震動と免震構造への対策案に関する課題—その 1: 設計用・検証用地震動の位置づけについて—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造 II), 21628, 2016.
- 16) 中澤俊幸, 加地孝敏, 境 茂樹, 久田嘉章, 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期・長時間地震動と免震構造への対策案に関する課題—その 2: 免震構造の応答と耐震設計に関する考察と課題—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造 II), 21629, 2016.
- 17) 国立研究開発法人 建築研究所, 長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ, 2016.
- 18) 加藤研一, 久田嘉章, 石田 寛, 渡辺哲史, 鈴木文乃, 小鹿紀英, 東京臨海部を対象とした想定地震に基づく設計用地震動評価例, 日本建築学会技術報告集, 2016(掲載決定)。
- 19) 東京都・財務局, 構造設計指針, 2016. 4.
- 20) FEMA, Risk Management Series, Designing for Earth-quakes, A Manual for Architects, FEMA 454, 2006.
- 21) FEMA, NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures Volume II: Part 3 Re-source Papers, FEMA P-1050-2, 2015.
- 22) 久田嘉章, 活断層近傍の強震動と免震—日本免震構造協会 創立 20 周年記念特集号—, MENSIN, 86 号, 11, 2014. 11.
- 23) 林 将利, 栗栖寛弥, 大澤元嗣ほか, 断層近傍に建つ免震建築物の設計について(その 1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造 II), 21102~21104, 2015.

機能継続・早期復旧を可能とする大地震対策建築モデルの開発 ～設備施設の耐震性能向上～

建築設備 ライフライン 配管の耐力 設備補強

西川 豊宏*

1. はじめに

東日本大震災時において、首都圏の超高層建築を中心に観測された長周期地震動は、建築構造躯体よりもむしろライフラインを掌る建築設備の配管にて多種多様な被害が顕在化した。本年度の活動成果としては、そのような被害を教訓とし、先ず超高層建築の隅々まで配管されているスプリンクラー（以降、「SP」と称する）を対象に、耐震性能を数値計算により評価し、SP 配管を吊り支持する吊りボルトについても、これまでに収集した振動台実験結果に基づきその耐震性能を評価した。さらに、脆弱箇所耐震対策を施した際の効果を検証した。

2. SP 配管の耐震性能

2.1 数値計算概要

評価建物の SP 配管の耐震性能を既報（第 5 報）で再現した SP 立て配管及び SP 横走り配管のモデルに対して動的外力を入力し、配管応力解析ソフト^{注 1)}を用いた数値計算により評価する。図 1 に評価に用いた入力波形の一例を示す。評価建物では、首都直下地震を想定した構造躯体の弾塑性応答解析により、各階の応答加速度¹⁾²⁾が評価されており、EW（東西）方向に比べ NS（南北）方向に大きな加速度が算出される。そこで、数値計算に用いた入力波は首都直下地震時に評価建物で想定される各階の応答加速度波形とし、入力方向は NS 方向とした。なお、SP 立て配管については床スラブ貫通部、区画貫通部、U 字バンド固定部に、SP 横走り配管については区画貫通部、

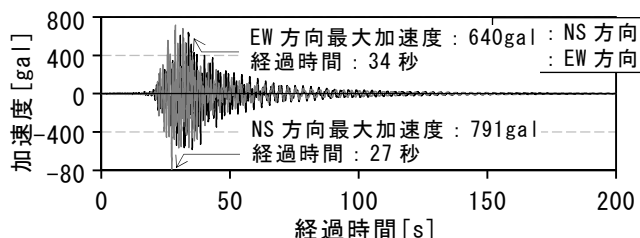


図 1 首都直下地震時の応答加速度波形（29 階）

吊りボルトの躯体への固定部に各階の応答加速度波形を入力した。

2.2 SP 立て配管の発生応力度

図 2 に SP 立て配管の応力分布図を示す。時刻歴応答解析の時間内における各部材の最大応力度を示した。応力分布図より、SP 立て配管の床スラブ貫通部及び SP 横走り配管への分岐部において応力集中が予測された。最大応力度は、階高が最大である 22 階の SP 横走り配管への分岐部に 11 N/mm^2 が生じたが、溶接継ぎ手部の許容応力度^{注 2)} 112 N/mm^2 に比べ極めて小さく、SP 立て配管は十分な耐震性能を有しているといえる。

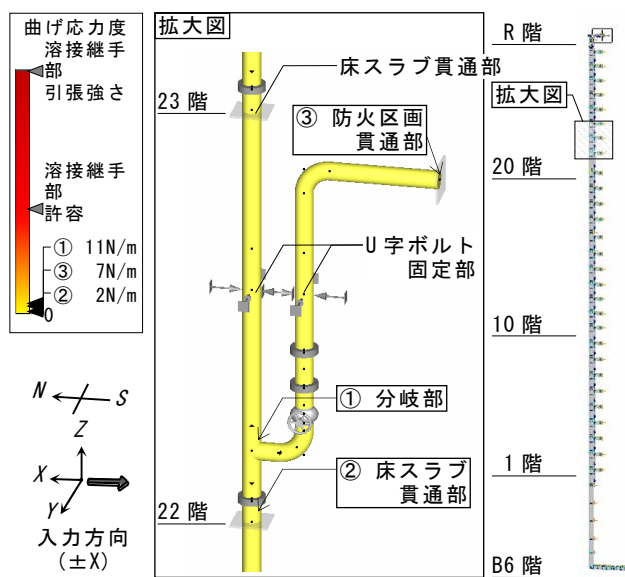


図 2 SP 立て配管における応力分布図

2.3 SP 横走り配管の発生応力度

図 3 に SP 横走り配管の応力分布図を示す。首都直下地震時に評価建物において、29 階床で最大応答加速度が生じることから 28 階を対象とした。時刻歴応答解析の結果、SP 横走り配管の応力度は、配水主管及び配水管に比べ枝管に大きく生じ、とりわけ枝管の曲がり部及び分岐部において応力集中が予測された。配水主管、配水管の応力度は、それぞれ 4 N/mm^2 、 32 N/mm^2 が生じたが、いずれも溶接継ぎ手部の許容応

* : 工学院大学建築学部まちづくり学科

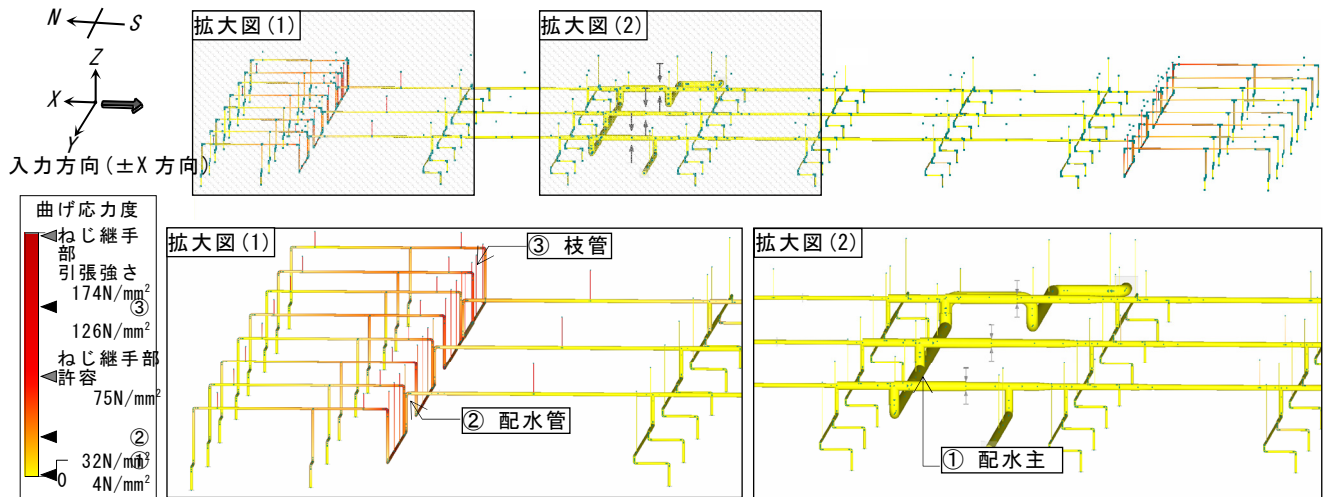


図 3 28 階 SP 横走り配管の応力分布図

力度^{注 2)}112 N/mm²よりも小さい。最大応力度は、枝管の曲がり部に 126 N/mm²が生じ、ねじ継手部の許容応力度^{注 2)}75 N/mm²より大きな応力度が生じた。しかし、SP 横走り配管全体でねじ継手部の引張強さ^{注 2)}174 N/mm²よりも大きな応力度は生じなかった。

3. SP 配管を吊り支持する吊りボルトの耐震性能

3. 1 吊りボルトの耐震性能に関する振動台実験

鉛直方向の揺れに対する吊りボルトの耐震性能の把握を目的とし、振動台実験を行った。既報(第 4 報)と同条件の試験体に対し、ランダム波(以下 神戸波)を用い水平 2 方向及び鉛直方向(以下 3 軸方向)へ加振した。図 4 に加振方向を変更した際の吊りボルト破断までの累積回転角^{※1)}を示す。図中には、振動台実験を同条件で 3 つの試験体に対し行いその平均値を示した。振動台実験の結果、神戸波を用い水平 1 方向(以下 1 軸方向)、水平 2 方向(以下 2 軸方向)に加振を行った試験体の吊りボルト破断までの累積回転角は概ね同等である。これに対し、3 軸方向に加振を行った試験体の吊りボルト破断までの累積回転角は、1 軸方向、2 軸方向に加振を行った

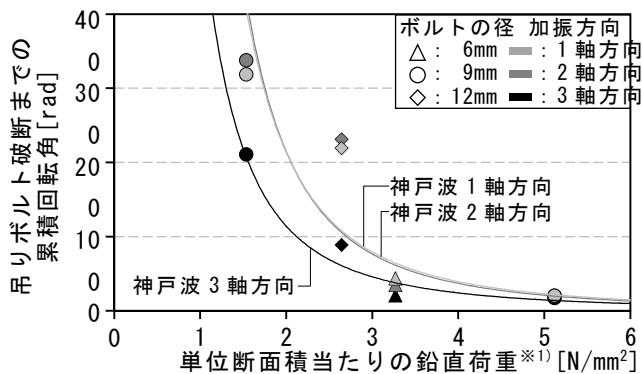


図 4 吊りボルト破断までの累積回転角

試験体に比べ平均で 6 割程度に小さくなった。このことから吊りボルトは、水平方向のみならず鉛直方向の揺れにより損傷することを示した。

3. 2 時刻歴応答解析概要

既報(第 4 報)では吊りボルトは瞬時的な力ではなく継続的な揺れにより損傷が蓄積し破断に至ることを示した。このことから、既存建物の吊りボルトは過去に発生した地震により耐震性能が低下していることが懸念される。そこで、本報では評価建物の SP 配管を吊り支持する吊りボルトを対象に、これまでの実験結果に基づきその耐震性能を回転角により評価した。その際、評価建物にて過去に観測された地震動^{注 3) 3)}(以下 観測地震動)による吊りボルトの回転角を時刻歴応答解析により算出することで、吊りボルトの耐震性能の低下を考慮した。なお、前章の評価にて評価建物の SP 配管は配管径 40A の枝管が脆弱箇所としてあげられることから、充水された配管径 40A の SGP 配管(以下 40A 配管)を吊り支持す

$$k = \frac{12EI}{L^3} + \frac{mg}{L} \quad \dots \text{式(1)}$$

k : 吊りボルトの水平剛性
 E : ヤング係数(=205,000)
 I : 吊りボルトの断面二次モーメント^{注 4)} [mm⁴]
 L : 吊り長さ [mm]
 m : 吊りボルト 1 本当たりの配管の重量 [kg]
 g : 重力加速度 [m/s²]

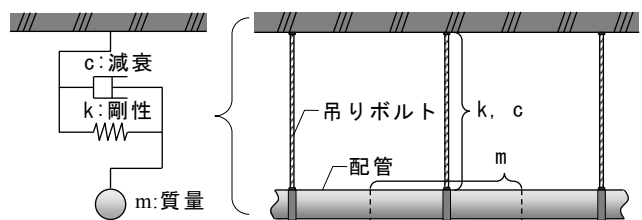


図 5 一質点系モデルの概要

る吊りボルトを対象とし、首都直下地震に対する耐震性能を評価する。入力波形は SP 配管同様図 1 に示した首都直下地震時の 29 階床スラブ応答加速度波形とし、NS 方向及び EW 方向に入力した。

図 5 に時刻歴応答解析に用いたモデルを示す。剛性に関しては、式(1)を用い算出し、振動台実験にて継続的な加振による低下を確認したため減少率を与えた。また、減衰については吊りボルトの減衰係数を瞬間剛性比例型として与え、積分方法は Newmark の β 法 ($\beta=1/4$) を用い、刻み時間は 0.01 秒とした。

3. 3 観測地震動による吊りボルトの累積回転角

図 6 に 40A 配管を吊り支持する吊りボルトの耐震性能、図 7 に観測地震動による 40A 配管を吊り支持する吊りボルトの累積回転角を示す。文献⁴⁾を参考に吊りボルトの単位断面積あたりに加わる配管の鉛直荷重を算出したところ、40A 配管は 2.1 N/mm^2 であり、振動台実験結果^{注 5)}に基づき吊りボルト破断までの累積回転角は 198rad と予測できる。時刻歴応答解析により算出した観測地震動による吊りボルトの累積回転角を総計すると 23rad となり、吊りボルト破断までの累積回転角の 12% に相当する。さらに、首都直下地震時には 2.4rad の累積回転角が算出され、観測地震動を考慮し総計は 25rad となり吊りボルト破断までの累積回転角の 13% にまで大きくなる。

4. 耐震対策の検討

4. 1 耐震対策の概要

評価建物において現状の SP 配管は、枝管の曲がり部に最大応力度が生じた。そのため、脆弱箇所である枝管に耐震対策としてブレースを設置した際の耐震性能を検証した。既報(第 5 報)と同条件のブレース

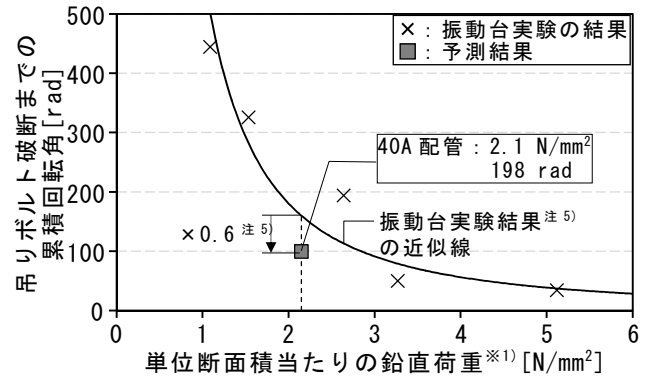


図 6 配管を吊り支持する吊りボルトの耐震性能

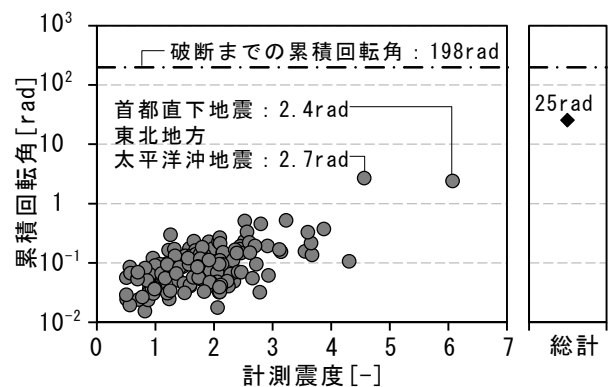


図 7 計測震度と累積回転角の関係^{注 6)}

ス^{注 7) 4)}を、枝管を吊り支持する既存の吊りボルト計 8 箇所再現し、NS 方向の変位を抑制した。

4. 2 耐震対策後の発生応力度

図 8 に耐震対策としてブレースを設置した際の SP 横走り配管の応力分布図を示す。耐震対策としてブレースを設置することで、現状の評価において最大応力度が生じた枝管曲がり部にて生じる応力度は 8 N/mm^2 と小さくなった。また、SP 横走り配管全体で許容応力度より大きな応力度の発生は生じなかった。

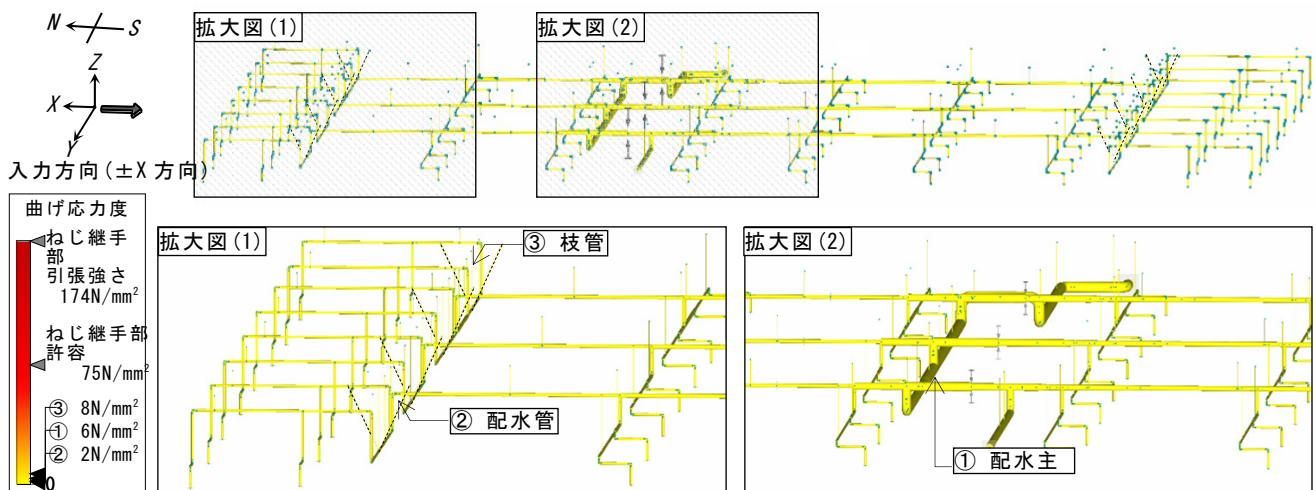


図 8 耐震対策後横走り配管の応力分布図

5. 耐震対策前後の損傷確率

図 9 に評価建物における耐震対策前後の SP 配管及び吊りボルトの損傷確率を示す。損傷確率は、既報（第 1 報）^{※5)} 同様に文献⁵⁾を参考に算出した。その際、SP 配管及びそれを支持する吊りボルトの耐力値の対数標準偏差^{注 8)}は、それぞれ 0.3、0.35 とし、作用地震動の対数標準偏差^{注 8)}は 0.4 とした。その結果、評価建物における現状の SP 立て配管、SP 横走り配管、吊りボルトそれぞれの最大損傷確率は、 $10^{-8}\%$ 、26%、0.01% となり、SP 立て配管、吊りボルトに比べ SP 横走り配管が最大になった。なお、最大損傷確率は最大応力度が生じた SP 横走り配管の枝管の曲がり部にて算出され地震リスクが大きいことを示した。対して、耐震対策としてブレースを施すことにより、SP 横走り配管の損傷確率は変位量とともに小さくなり、その効果を示した。また、SP 横走り配管の変位量が小さくなったことから、配管を吊り支持する吊りボルトに対しても対策の効果を期待できる。

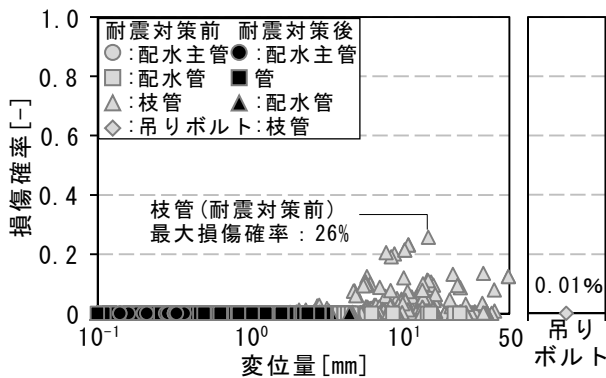


図 9 SP 配管及び吊りボルトの損傷確率

6. まとめ

評価建物の SP 配管及びそれを吊り支持する吊りボルトを対象に、首都直下地震に対する耐震性能と損傷確率を評価し、地震リスクを分析した。以下に得られた知見を示す。

- ・振動台実験より配管を吊り支持する吊りボルトは、水平方向のみならず鉛直の加振により損傷する。
- ・首都直下地震に対する評価建物の SP 配管及びそれを支持する吊りボルトの損傷確率は、SP 横走り配管の枝管曲がり部で 26% と最大となった。
- ・耐震対策として枝管にブレースを設置することで、評価建物の SP 横走り配管の枝管曲がり部の損傷確率は小さくなり、耐震対策の効果を示した。

今後は、消火設備のみならず、常用設備も含め、地震リスクに関する分析を行う予定である。

注 記

- 注 1) 配管応力解析は、AutoPIPE (株式会社ペントレー・システムズ) を用いた。
- 注 2) 配管における許容応力度及び引張強さは、文献⁴⁾において ASME 規格に準拠しているため、ASME 規格に基づき、安全率は 3.5、継手効率は配管の直管部 1.0、溶接継手部 0.9、ねじ継手部 0.6 の値を用いた。
- 注 3) 評価建物 29 階で 1998 年 4 月から 2015 年 6 月の期間に観測された床スラブ応答加速度波形全 219 波を対象とした。
- 注 4) 吊りボルトの直径は、設置した試験体を自由振動させ得られた固有振動数より算出した 7.1mm とした。
- 注 5) 吊り長さ 300mm を同条件として、吊りボルトの径、錘の重さを変更し、東北地方太平洋沖地震の際に評価建物 29 階にて観測した最大応答加速度³⁾と同等の加速度 300gal の正弦波を用い加振した際の振動台実験結果を用い、鉛直方向に加振した際の吊りボルト破断までの累積回転角は水平方向のみに比べ、小さくなったため 0.6 を乗じた。
- 注 6) 気象庁の算出方法⁶⁾を参考に、観測地震動各々の計測震度を算出した。
- 注 7) 文献⁴⁾p. 160 表 3・19 の No. D-11 を参考にブレースを再現した。
- 注 8) 耐力値の対数標準偏差は、SP 配管については文献⁵⁾を参考に仮定し、吊りボルトについては振動台実験に基づき算定した。また、作用地震動の対数標準偏差は文献⁵⁾を参考に仮定した。

本論文に関連する研究論文

- ※1) 米山嘉貴ほか：事業継続統計画策定における建築設備の地震リスクに関する研究(第 4 報)吊りボルトの振動台実験結果に基づく耐震性能評価，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 189-192, 2014 年 9 月
- ※2) 武田和也ほか：事業継続統計画策定における建築設備の地震リスクに関する研究(第 5 報)地震時におけるスプリンクラー配管の耐震性能について，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 193-196, 2014 年 9 月
- ※3) 島倉雅宗ほか：事業継続統計画策定を支援する建築の非構造部材・建築設備の地震リスクに関する研究(その 9)数値計算によるスプリンクラー配管の耐震性能予測，日本建築学会大会学術論文集，2016 年 9 月
- ※4) 矢ヶ崎啓介ほか：事業継続統計画策定を支援する建築の非構造部材・建築設備の地震リスクに関する研究(その 10)実験結果に基づく建築設備配管を吊り支持する吊りボルトの耐震性能予測，日本建築学会大会学術論文集，2016 年 9 月
- ※5) 志津えりかほか：事業継続統計画策定における建築設備の地震リスクに関する研究(第 1 報)東北地方太平洋沖地震における水使用とその設備被害の評価，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp. 2333-2336, 2012 年 9 月

参考文献

- 1) 田中良一，久田義章ほか：首都圏にある超高層キャンパスの地震防災に関する研究(その 2)首都直下地震の強振動予測，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，2007. 8
- 2) 島村賢太，山下哲郎，久田嘉章ほか：首都圏に建つ超高層キャンパスの地震応答と制震補強に関する研究(その 1)弾塑性地震応答解析に基づく構造被害の予測，日本建築学会学術講演梗概集(東北)，2009. 8
- 3) 久田研究室：工学院大学観測波形公開ページ(新宿キャンパス)，<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/newhp/index.html>，参照 2016. 1. 7
- 4) 公益社団法人 空気調和・衛生工学会：建築設備の耐震設計 施工法，pp. 103-105, 160, 314, 276-278, 2012. 11
- 5) 遠藤透，中村孝明ほか：被害相関を考慮した建築設備の地震時復旧曲線の評価，日本建築学会技術報告集，vol. 14, No. 28, pp. 503-508, 2008 年
- 6) 気象庁：計測震度の算出方法，http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.html，参照 2016. 4. 2

超高層ビルの構造・非構造部材における要素材料の長期耐用性に関する研究 ～築 27 年経過した PC 板シーリング材の劣化度と損傷リスク評価～

小野航太郎*, 田村雅紀**, 阿部道彦**, 岡健太郎***

1. はじめに

近年、高層建築物の改修工事が増加しているのにもかかわらず、高層建築物の経年劣化の調査報告が少ない。シーリング材は各種仕上材の中でも比較的耐用年数が短く、また常に露出状態で使用され、風・雨・日射等による気象の影響を受けやすいため劣化しやすい。本研究では 27 年間使用されているが、未だ劣化調査を行っていない工学院大学新宿校舎のシーリング材を対象にする。設立から 28 年目にして新宿校舎の外壁にあるすべてのシーリング材を新しく補修することが予定されているが、27 年間一度も予防保全がされていない超高層建築のシーリング材は劣化度や保全の面でも貴重なサンプルになるため、研究の対象にしていく。カーテンウォール廻りからシーリング材を採取し、種類は 2 成分系変成シリコンであることがヒアリング調査から判明している(窓枠には汚れ防止のために 2 成分系シリコンを使用している)。シーリング材を東西南北の高層・中層・低層に分けてシーリング材の経年劣化による力学的性能・耐久性といった物性能力の低下の度合いを把握する目的で物性試験の調査を行う。高さ・方位・劣化状況の違いを考慮しながら 100 年の期間を想定してシーリング材の補修予算の積算を行い、予防保全が必要かどうか調査を行う。本研究の流れを図 1 で示す。

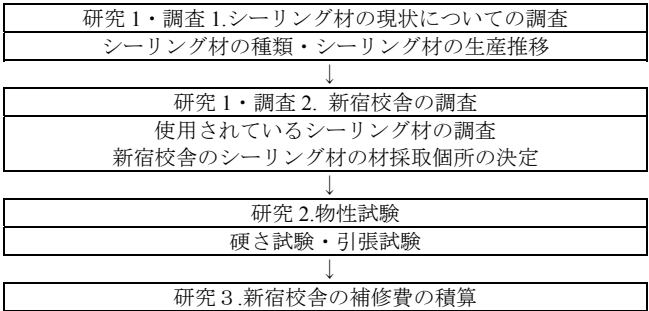


図 1 研究の流れ

表 1 使用材料

分類	使用材料	場所	方角	高さ	経過年数	その他
構造材	pc パネル	都内	東方向	上層	27 年	5m×2m の基本モジュール
				中層		
				低層		
仕上材	タイル	西		上層		50mm 二丁 (45mm×95mm)
		新		中層		
		宿		低層		
機能材	2 成分系変成シリコン	地区		上層		直径 40cm 20 本採取 (No.1～20)
				中層		
				低層		

表 2 実験要因と水準

	実験要因		水準
	調査 1	文献調査	防水工事関係の論文
研究 1	調査 2	ヒアリング	外装工事業者 a 社、施設課 s 様
		対象建築物	工学院大学新宿校舎
		施工年度	1989 年
		サンプル採取箇所	新宿校舎の上層・中層・低層の東西南北縦・横目地 No.1～20
研究 2	引張試験	JIS K 6251 加流ゴム及び熱可塑性ゴム-引張特性	
	硬さ試験	JIS K 6253 加流ゴム及び熱可塑性ゴム-ゴムの硬さ	
研究 3	予算積算	新宿校舎の 100 年間の補修予算の積算比較	

表 3 実験項目と評価方法

		項目	方法
研究 1	調査 1	文献調査	超高層ビルの高さ関係を考慮したシーリング材の経年劣化による調査
	調査 2	建築物調査	対象建築物の調査,サンプル採取場所の決定,目視調査による問題点の発見
研究 2	引張試験	JIS K 6251 の引張試験方法に準拠して引張応力、被断時の伸びを測定	
	硬さ試験	JIS K 6253 の硬さ試験方法を参考にし、デジタルフォースゲージを用いてゴムの硬度を測定	
研究 3	補修予算積算比較	建築工事の積算を参考にシーリング材の単価を求めて新宿校舎の補修予算の積算比較	

表 4 シーリング材劣化度の分類

調査項目		劣化度			
		Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	
防水機能関連	漏水または痕跡	あり	—	なし	
	シーリング材の被着面の剥離	深さの 1/2 以上または深さ 5 mm 以上	深さの 1/4～1/2 または深さ 2～5 mm	深さの 1/4 未満または深さ 2 mm 未満	
	シーリング材の破断	厚みの 1/2 以上または深さ 5 mm 以上	厚みの 1/4～1/2 または深さ 2～5 mm	厚みの 1/4 未満または深さ 2 mm 未満	
	被着体の破損	ひび割れ幅 0.3 mm 以上	同左 0.1～0.3 mm	同左 0.1 mm 未満	
	シーリング材の変形	凹凸が厚みの 1/2 以上または深さ 5 mm 以上	凹凸が厚みの 1/4～1/2 または深さ 2～5 mm	凹凸が厚みの 1/4 未満または深さ 2 mm 未満	
	シーリング材の軟化	指先に多量に付着	指先にかなり付着	指先にわずかに付着	
意匠・外観関連	しわ	凹凸の深さ 1～2 mm	同左 0.5～1 mm	わずかに波打っている	
	変退色	変退色が極めて著しい	変退色がかなり存在する	変退色が少し存在する	
	ひびわれ	ひびわれ幅 1～2 mm	同左 0.5～1 mm	同左 0.5 mm 未満	
	白亜化	指先に多量に付着	指先にかなり付着	指先にわずかに付着	
	仕上材の浮き変色	剥離や変色がある	ひび、やや変色している	左の現象が軽微である	
物性	50%引張応力	初期値比	5 倍以上 1/5 以下	3～5 倍 1/3 以上	
		測定値	0.59N/mm ² 以上 0.03N/mm ² 以下	0.39～0.59N/mm ² 0.03～0.06N/mm ²	0.39N/mm ² 以下 0.06N/mm ² 以上
	伸び	初期値比	1/5 以下	1/3～1/5	1/3 以上
		測定値	200% 以下	200～500%	500% 以上
評価	劣化度評価	補修が必要	早い時期に補修が必要	現状放置可能	

*工学院大学建築学部建築学科・学部 4 年 *工学院大学建築学部建築学科・教授

**工学院大学大学院建築学専攻・修士 2 年

2. 工学院大学新宿校舎のシーリング材のサンプル採取

2.1 シーリング材のサンプル採取箇所

新宿校舎のシーリング材を対象に東西南北の高層・中層・低層の縦・横目地(低層の横目地は化粧目地のため縦目地のみ)に分け(図2a参照)合計20本のサンプル(図2b)を採取する(表5)。採取するサンプル1本の長さは40cmであり、測定する箇所の名称を暴露していた面を表面、建物の接着面側を裏面、側面を右側面と左側面に分ける(図2c)。

2.2 シーリング材の採取方法

外装工事業者 a 社に依頼をし、新宿校舎の高層・中層はゴンドラを使用しサンプルの採取を行い、低層は地上階のため足場を組まないで作業を行う。新宿校舎の外壁のシーリング材をカッターナイフで切り取り、補修箇所の周囲にマスキングテープを張り付けてから切り取った箇所に新規のシーリング材である1成分系変成シリコーンを充填する。コテで平らに均した後にマスキングテープをはがして、養生する作業を合計で20本分行う。

2.3 採取したシーリング材の劣化度の評価方法の種類

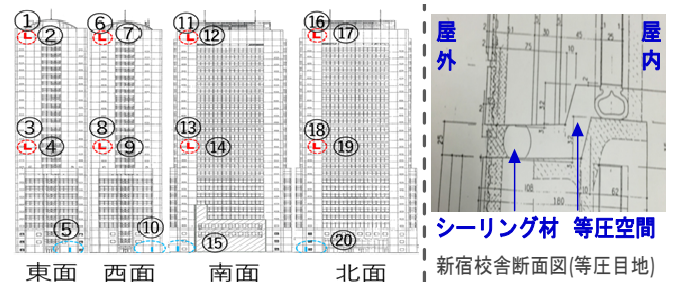
新宿校舎から採取したシーリング材の劣化度を評価するときに「建築防水の耐久性向上技術」(以下、技術指針とする)を参考にして、劣化度の指標(表4参照)をⅠ・Ⅱ・Ⅲに分けて示す。新宿校舎から採取したシーリング材の劣化度の評価方法は、防水機能と意匠・外観を元に評価を決める外観検査と、50%引張応力と破断時の伸びから評価を決める物性試験の2つの結果を総合して評価を決める。Ⅰから順に数値が上がるごとにシーリング材の経年劣化による耐久性の危険度が上がっていき、劣化度Ⅰは現状放置可能、劣化度Ⅱは早い時期に補修が必要(現状放置可能)劣化度Ⅲは補修が必要(表4参照)と技術指針によって定義されている。

2.4 採取したシーリング材の劣化度の評価

新宿校舎から採取したシーリング材の劣化度の結果(表6参照)を方角ごとにみると(図3参照)東方向は中層・横目地以外は劣化度がⅢであるため、全体的に劣化している。西方向は上層が劣化度Ⅱで中層・下層は劣化度Ⅲであるため、下層にいくほど劣化している。南方向も西方向と同様に下層にいくにつれて劣化度が高くなる傾向にある。南方向は西方向と経年劣化の傾向が似ていることから、劣化の要因が直射日光と関係していると推測される。北方向は上層・中層が劣化度Ⅲであり、低い位置よりも高い位置の方が劣化している。上記のことから建物高さと方位による経年劣化は関係があることが判明した。

表5 新宿校舎から採取したサンプルの番号と採取箇所

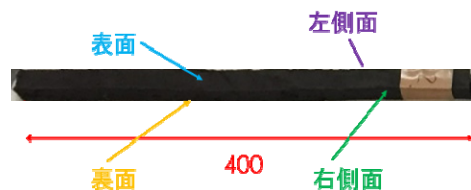
試料 NO.	方角	採取場所	採取したシーリング材の向き
1	東面	RF PC 板間	縦目地
2			横目地
3		15F PC 板間	縦目地
4			横目地
5	西面	1F PC 板間	縦目地
6			横目地
7		RF PC 板間	縦目地
8			横目地
9	南面	15F PC 板間	縦目地
10			横目地
11		1F PC 板間	縦目地
12			横目地
13	北面	RF PC 板間	縦目地
14			横目地
15		15F PC 板間	縦目地
16			横目地
17	北面	RF PC 板間	縦目地
18			横目地
19		15F PC 板間	縦目地
20			横目地



a) シーリング材サンプル採取(左：採取位置、右：断面図)



b) 採取したシーリング材サンプル(20本)



c) 採取したシーリング材サンプルの寸法と名称

図2 新宿校舎のシーリング材サンプル採取概要

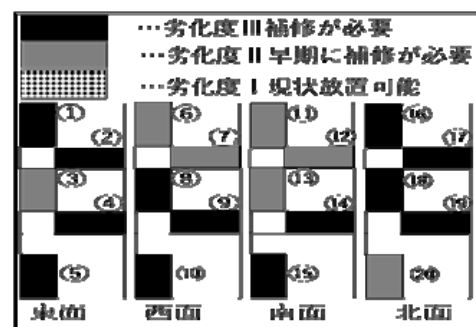


図3 新宿校舎のシーリング材の外観劣化度評価模式図

3. 工学院大学新宿校舎から採取したシーリング材の物性試験

3.1 採取したシーリング材の引張試験の実験方法と結果

3.1.1 採取したシーリング材の引張試験の実験方法

JIS K 6251 の加硫ゴムの引張試験方法に準拠して採取したシーリング材で試験を行う。50%引張応力(N/mm2)・最大引張応力(N/mm2)・破断時の伸びを求めて 20 箇所測定する。新宿校舎から採取したシーリング材をダンベル 3 号形に加工(図 4)をして表層から厚さ約 2mm ごとに 上・低層の 2 層にスライスをし試験体を合計 40 本作成する。

3.1.2 採取したシーリング材の 50%引張応力の結果

採取したシーリング材のサンプルの 50%引張応力の測定結果(図 5 参照)を高さ別に見ると低層が 1 番引張応力が高く上層と中層では上層のほうが少し引張応力が高いことが分かる。劣化度の中でも 1 番正常な状態である劣化度 I を満たす条件(表 6 参照)が採取したシーリング材のサンプルは全て劣化度 I であるため物性能力は低下していない。

3.2 採取したシーリング材の硬度試験の実験方法と結果

3.2.1 採取したシーリング材の硬度試験の実験方法

シーリング材の引張応力の結果（図 5 参照）を参照してデジタルフォースゲージで測定したシーリング材の全体の数値を硬度に置き換える。採取したシーリング材 20 本の中の 1 本につき表面と裏面は奥行き方向に 5 か所、それを直径方向に 5 か所、25 か所ずつ測定。側面は奥行き方向に 3 か所直径方向に 5 か所、計 15 か所を測定する。測定番号は表・裏面は左から右に手前側から奥にかけて番号が大きくなっており、側面は左から右にかけて被着面に近づくにつれ番号が大きくなっている(図 6 参照)。一つのサンプルから 80 か所採取し、20 本測定したため、全 1600 か所測定した。

3.2.2 採取したシーリング材の硬度試験の実験結果

南側の上層縦目地(試料 No.11)に着目して表面(図 7a 参照)裏面(図 7b 参照)の数値を比較した。表面と裏面の表面の結果に着目すると直径方向は中央に行くほど硬度の数値が高くなりやすい傾向にあることが読み取れることから負荷が中央に集中して硬化しやすくなっていることが推測される。奥行き方向は中央よりも端に行くほうが硬度が高い。これはシーリング材の端の方が建物と接していたため負荷が大きくなり硬度が大きくなったと推測される。

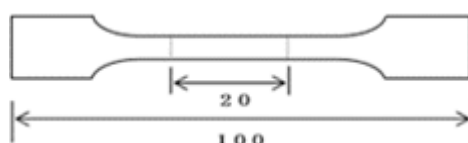


図 4 シーリング材の引張試験の試験体・ダンベル 3 号形

表 6 新宿校舎から採取したシーリング材の劣化度の結果一覧

試料 NO.	表面状態	劣化度		判定
		外観	物性	
1	ひび割れ,汚れ付着	II	I	II
2	ひび割れ,汚れ付着	II	I	II
3	ひび割れ,汚れ付着	II	I	II
4	ひび割れ,汚れ付着,しわ,退色	III	I	III
5	ひび割れ,汚れ付着,しわ,退色	III	I	III
6	ひび割れ,汚れ付着,退色	III	I	III
7	ひび割れ,汚れ付着,退色	III	I	III
8	ひび割れ,汚れ付着,退色	III	I	III
9	ひび割れ,汚れ付着,退色	III	I	III
10	汚れ付着	II	I	II
11	ひび割れ,汚れ付着,退色	III	I	III
12	ひび割れ,汚れ付着,退色	III	I	III
13	ひび割れ,汚れ付着	II	I	II
14	ひび割れ,汚れ付着,退色	III	I	III
15	ひび割れ,汚れ付着,しわ	III	I	III
16	ひび割れ,汚れ付着	II	I	II
17	ひび割れ,汚れ付着,退色	II	I	II
18	ひび割れ,汚れ付着,退色	III	I	III
19	ひび割れ,汚れ付着,退色	III	I	III
20	ひび割れ,汚れ付着	III	I	III

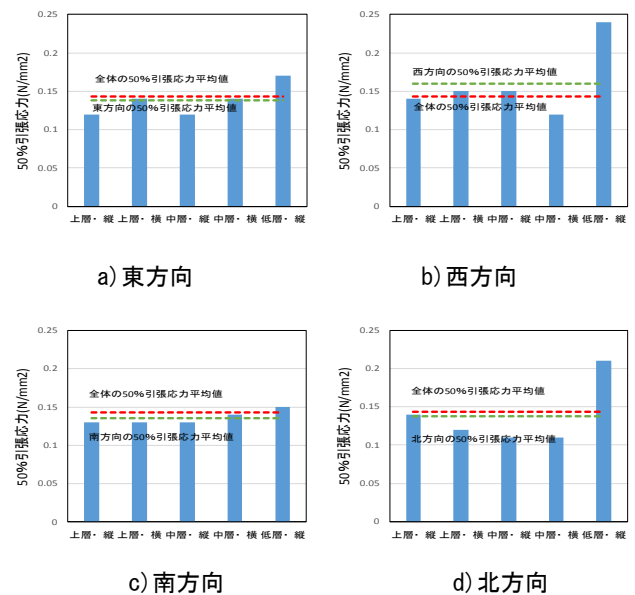
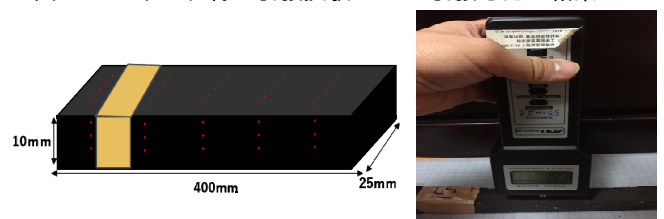
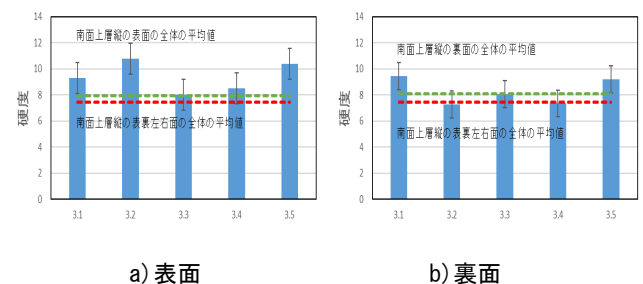


図 5 シーリング材の引張試験の 50%引張応力の結果



a) 試験体の測定箇所と寸法 b) 硬度試験実験写真

図 6 採取した試験体の硬度試験の測定箇所



a) 表面 b) 裏面

図 7 南面上層縦のシーリング材の表面と裏面の結果の比較

4. 新宿校舎のシーリング材の劣化リスクの計算と結果

4.1 新宿校舎のシーリング材の劣化リスクの計算方法

新宿校舎のシーリング材の補修工事費用と補修工事の頻度により工事費リスクを算出する。リスク値は JIS A 8051-2004 の規定に準拠し次の式 1)により算出する。

R(損傷回復リスク値：円)

=P(損傷発生確率：%) ×E(損傷影響度：円) -1)

今回は発生確率を補修工事の頻度とし、本研究の対象建築物が築 28 年で補修工事を行うため、29 年経過時点で劣化度Ⅲの箇所が漏水すると仮定、33 年経過した時点ですべての箇所が漏水すると仮定したとき、100 年の期間内で 28 年ごとに補修工事を行う c1、29 年ごとに劣化度Ⅲの漏水と劣化の補修工事を行う c2、33 年ごとに全箇所の漏水と劣化の補修工事を行う c3 とする。一方の影響度は補修工事費と損害金額とする。シーリング材 1m 当たりの単価(表 8 参照)をもとにすると補修作業の単価は 1m 当たり 1770 円のため、表 8 を参考に新宿校舎のシーリング材の補修費だけを考えると工事費用は (1700 万)となった。新宿校舎は教室空間を有し外装タイルの点検・補修工事に加わり、さらに 28 年目の最初のシーリング工事のためタイルを含む外装清掃工事が追加されることから追加で 1700 万円がかかることがヒアリング調査から判明しているため 1 回の補修工事で合計 3400 万円になる。損害金額は漏水した時の影響を仮定し、被害が生じた部屋のエアコンの修理費用と石膏ボードの修理費を想定して 1 部屋当たり 100 万円の損失としてリスク値を求める。

4.2 新宿校舎のシーリング材の劣化リスクの計算結果

新宿校舎の工事費リスクの結果(図 8 参照)を見ると、c1 の補修工事金額だけの 1 億 2000 万円に対して、c2 は 6 億 3300 万円、c3 は 8 億 8200 万円と漏水のリスクが高まることに比例して工事の金額が大幅に増えることが読み取れる。c1 と c2 に着目して結果を比較すると漏水による損失が約 5 億円と影響が大きいため、28 年で劣化度Ⅲの箇所が多くなる前に 1 度メンテナンスが必要だと推測される。

5. まとめ

- 1)本研究の結果、新宿校舎から採取したシーリング材は物性より外観の劣化の度合いが大きいことが判明した。
- 2)今後は劣化度Ⅲとなる箇所を事前にメンテナンスを行い、経年劣化を防ぐことで外観の劣化による漏水を未然に防ぐ必要があり、定期的な補修工事を行う必要性があると予想される。

表 7 新宿校舎の工事費リスクの概要

a) 2 成分系変成シリコンの 1m における労務費

名称	規格	単位	数量	単価(円)	金額(円)
シーリング	2 成分系	ℓ	0.34	1610	547.4
補足材	-	-	一式	-	161
防水工		人	0.044	19500	858
その他		-	一式	-	203.63
計	-	円	-	-	1770.03

b) 石こうボードの 1 m²における労務費

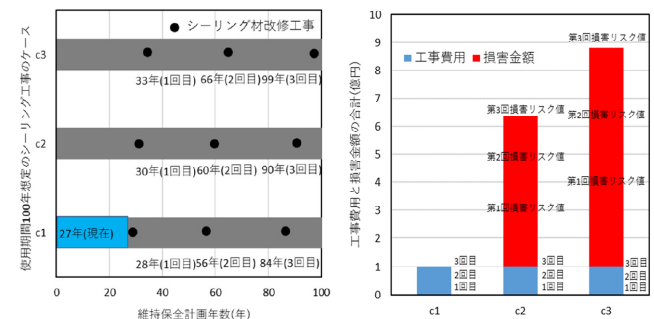
名称	規格	単位	数量	単価(円)	金額(円)
石こうボード張り	厚さ 9.5mm	m ²	1.05	163.02	171.17
ボード釘		kg	0.03	305.00	7.63
内装工		人	0.04	17500.00	700.00
その他		-	一式	-	114.24
合計		円	-	-	993.04

c) 窓際下の内部エアコンの台数 (台数@100 万円)

	東方向	西方向	南方向	北方向	合計
上層	0	0	69	58	127
中層	0	0	46	47	93
低層	0	4	21	15	40
合計	0	4	136	120	260

d) 方位・高さごとのエアコン漏水時損害金額 (台数×100 万=円)

	東	西	南	北	合計
上層	0	0	69000000	58000000	127000000
中層	0	0	46000000	47000000	93000000
低層	0	4000000	21000000	15000000	40000000
合計	0	4000000	136000000	120000000	260000000



a) 使用期間 100 年想定での各工事ケース b) 各ケースの費用の合計

図 8 新宿校舎の漏水リスク算定結果

参考文献

- 1)建築用シーリング材ハンドブック,日本シーリング材工業会 2013
- 2)建築防水の耐久性向上技術,技術堂出版,1987
- 3)建築工事の積算,経済調査会積算研究会,2012
- 4)高橋愛枝,他:10 年以上経過した超高層建物のシーリング材の劣化調査,大成建設技術センター報,第 43 号,2010

謝辞

本研究は、工学院大学施設課関係各位、日本シーリング材工業会、日本ビソ片岡範明氏関係各位に助力を賜り感謝致します。

超高層ビルの構造・非構造部材における要素材料の長期耐用性に関する研究 ～外壁タイルの浮き状況調査と剥落時損害リスクの算定～

尾林 岳*, 田村雅紀**, 岡健太郎***

1. はじめに

現在、日本国内の建物の多くで外装材として、タイルが選ばれている。これはタイルが美観、耐候性に優れており、分類として吸水率の低いⅠ類（磁器質系タイル）や、焼き締めを十分に行ったⅡ類（せつ器質系タイル）などがあるからである。だが外装タイルは、一般的なセメント系タイル貼付材を使用した場合、長期的なひずみや熱の影響で、構造体とタイルとの変位が生じ、浮き・剥離・剥落の危険性が生じる。本研究では、非破壊式の衝撃弾性波試験器を用いて、弾性波の減衰量を比較して、浮き等が生じている状況について調査をした上で、実際に付着試験器を用いてタイルを剥がし、その相関を確認するとともに、その原因を検討する。また、現在建物の外壁タイル補修工事などが行われてはいるものの、補修工事後の様な頻度で補修工事を行っていくのか、どのくらいの補修工事費を投入すれば、浮きタイルをなくすことが出来るかという情報が、テナントとの都合などにより明確にされてこなかった。そこで、実際の補修工事が行われた工学院大学新宿校舎にて、衝撃弾性波法による機械インピーダンス（HLD 値）を工事前後で計測し、HLD 値の向上したタイル数と工事費用から、今後の補修工事の必要回数と工事費用の算出を行い、どのくらいのリスクがあるのかを調査する。図 1 で本研究の流れを示す。

2. 浮きタイルの衝撃弾性波法による機械インピーダンス（HLD 値）の計測（研究 2）

2.1 外壁浮きタイル確認の概要

2.1.1 外壁浮きタイルの診断方法

外壁診断は、視覚的に浮きやひび割れを確認する目視調査と打診棒による打診法で行う。打診法では打診棒を用いたタイルを叩いた時の、音の違い（高音の時は浮きがあり、浮きのない物は低音である。）によって浮き部分の診断を行う。確認肯定は、打診棒でタイル面全体の確認を行う。その後浮いたタイルの機械インピーダンス（HLD 値）を小型反発度試験機で計測する。タイル 1 枚につき小型反発度試験機による衝撃弾性波試験を 3 回行う。試験機が示す硬さ HLD 値は、インパクトボディーの反発速度 V を打撃速度 V_0 で割り、1000 倍した値である。得られた 3 つの値の平均値が 800～1000 であれば補修不要条件、600～800 の間であれば補修十分条件、400～600 の間を補修必要条件（未補修浮きタイル）とし 5 階、6 回で同様に試験を行った。

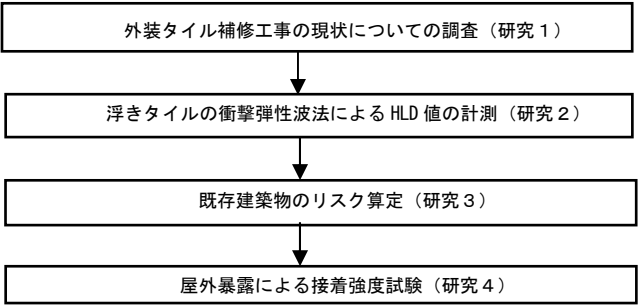


図 1 研究の流れ

表 1 タイル工事の現状の調査（研究 1）

調査先	内容
陶磁器タイル張り工事の現状と今後の動向 2014（2014 年 11 月 5 日）	東北地方太平洋沖地震外壁タイル調査報告書の結果より、弾性接着剤による施工では被害はない。JIS A 5209 の改定などにより弾性接着剤の需要が高まる。
外装タイル補修工事ヒアリング調査（2015 年 3 月 12 日）	補修箇所の確認は打音法のため個人間による差が生じる。機械的に確認ができると補修のムラが無い施工が可能。

表 2 使用材料（研究 4）

項目	寸法	備考
普通コンクリート平板	300×300×60 (mm)	JIS A 5371-2010 適合
外装施ゆうタイル	45×45×7 (mm)	JIS A 5209 適合
弾性接着剤（クリア）	—	JAIA 4VOC 適合
弾性接着剤（ホワイト）	—	JAIA 4VOC 適合
弾性接着剤（ブラック）	—	JAIA 4VOC 適合

表 3 実験概要及び要因と水準

		実験要因	水準
研究 1	調査 1	文献調査	構造系文献
	調査 2	実態調査	施工者、施工管理者
	調査 3	要求区分	安全性、耐久性、経済性
衝撃弾性波法による HLD 値の計測	対象建築物	研究調査	日本建築学会シンポジウム
		目視検査	ひび割れ、打診法
		衝撃弾性波試験	反発度、充填具合、（HLD 値）
既存建築物のリスク算定	既存建築物のリスク算定	算定方法	発生確率×影響度
		発生確率	1 年 (c1)、3 年 (c2)、5 年 (c3)
		発生時期	築 20 年から補修率 100%になるまで
		影響度	補修工事費用、損害賠償金額
接着強度試験	接着強度試験	タイルの機械インピーダンス	測定 3 回の平均
		気温	25℃～35℃
		接着剤種類	弾性接着剤
		接着剤の色	クリア、ホワイト、ブラック
		養生時間	1 日、3 日、7 日
		接着剤の量	15 g、30 g、45 g
		暴露試験体	Tc、Tb、Tw
		空隙試験体	Kc、Kb、Kw
		接着面積	190×60 (mm)

*大林組 **工学院大学建築学部建築学科・教授 ***大学院建築学専攻・修士 2 年

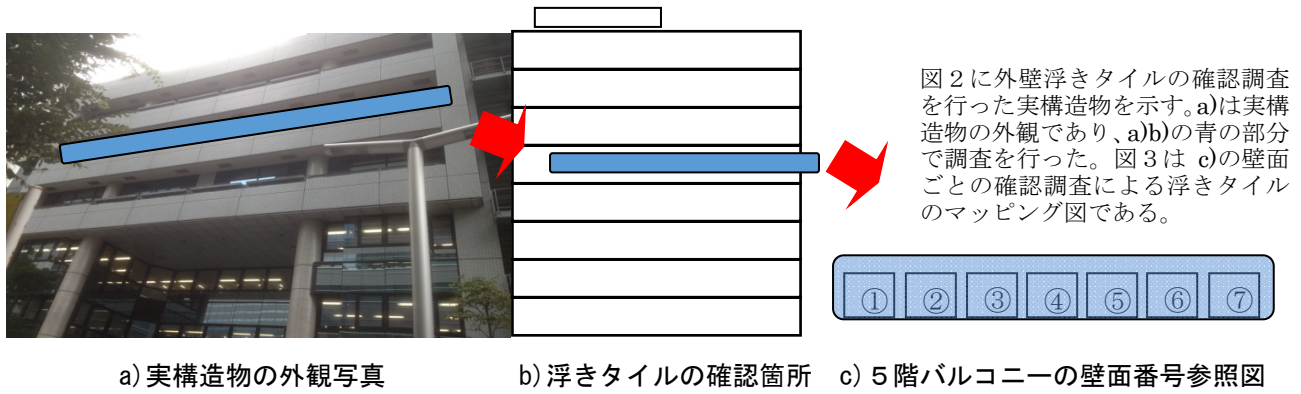
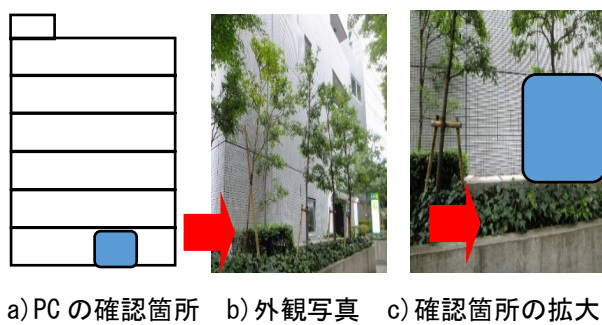


図 2 浮きタイル確認調査部分の概要図

801～	601～800	401～600	補修箇所(1000)	HLD 値は、インパクトボディーの反発速度 V を打撃速度 Vo で割り、1000 倍した値である。値が高いと密である	
壁面番号	①	②	④	⑤	⑥
補修前					
補修後					

図 3 中層棟 5 階浮きタイルマッピング図



801～	601～800	補修箇所	前回補修

d) PC 部分の浮きタイルマッピング図

図 4 外壁 PC タイル HLD 値の計測

2.1.2 衝撃弾性波法による反発度試験

今回の打診法による検査により以下のことがわかった。外壁タイル現状記録図面の中層棟南面バルコニーで浮きが出ているタイルの枚数と、実際に打診法で調べたものとは 40%ほど浮きが出ているタイルが少なかった。また、浮きが出ていると断定する HLD 値の認識の相違や打診法による確認方法の個人間の違いがある。

2.2 既存建物の外壁補修工事

2.2.1 MG アンカーピン工法による補修工事

今回の都内大学校舎 5 階 6 階の浮きタイル補修工事の工法は MG アンカーピン工法である。MG アンカーピン工法とは、浮きタイル中央を特殊ドリルで穿孔し、エポキシ樹脂でアンカーピンとコンクリートを接着させタイルを固定する工法である。

2.2.2 機械インピーダンス（HLD 値）の計測

補修工事着工以前に HLD 値が 800 以下のタイルは 341 枚あ

り、その内MGアンカーピン工法で補修されたのが 57 枚である。今回の補修工事で、中層棟 5 階 6 階バルコニー全体の 16.7%が補修されたこと、また今回と同条件下であった場合、あと 5 回補修工事を行わなければ HLD 値 800 以上のタイルが 100%にならない事が分かった。今回、中層棟の補修工事の費用が 2448 万 3150 円であり補修枚数は全体で 7933 枚であった。このことから浮きタイル 1 枚を補修するのに約 3,086 円掛かる事が分かる。5 階 6 階の浮きタイルが残り 284 枚あるので、浮きタイルを無くすために、87 万 6424 円掛かる、全体に占める浮きタイルの割合は、補修工事前が約 17.4%、補修工事後が約 14.5%と約 2.9%減少した。また、HLD 値が、向上しなかったのは今回の MG アンカーピン工法が、エポキシ樹脂を充填させるのではなくアンカーピンでの固定であるからと考えられる。今後エポキシ樹脂充填工法を行い、エポキシ樹脂をどのくらい注入したか、HLD 値が樹脂を注入した後に、どのくらい向上したかを具体的な数字で求めていく。そこから充填率、付着率の評価を出来る様にする。そして補修工事を行う際に、今回と同様に MG アンカーピン工法で行う場合、樹脂を充填させて補修をする場合のどちらが経済的なリスクが少ないかを発生確率と影響度から導出し評価する。

3. 既存建築物による経済リスクの算定（研究 3）

3.1 経済リスク算定の概要

研究 2 で得られた補修工事費用と、今回の補修率より都内大学校舎の工事費リスクを算定する。リスク値は JIS A 8051-2004 に規定されており、算定方法は下記である。

$$R \text{ リスク値} = R \text{ (発生確率データ)} \times E \text{ (影響度)}$$

今回は発生確率を補修工事の頻度とし、1 年 (c1)、3 年 (c2)、5 年 (c3) ごとに行う。一方影響度は補修工事費と損害賠償金額とする。補修工事費は 2448 万 3150 円 (2500 万円) とし、損害賠償金額は工事頻度による劣化タイル剥落損害賠償金額とし、竣工後一定期間 (築 20 年) を過ぎたとき、5 年ごとにタイル剥落による損害賠償金額の 1 億円が掛かると仮定する。また浮きタイルの無くなる補修率 100% になるまで浮きタイルによる剥落は続くものとする。今回の補修工事によって補修されたタイルの補修率より、今回の補修工事 5 回で浮きタイルがなくなることが分かった。この条件で対象となる壁面のタイルが、完全補修となるまでに掛かる金額の違いを調査し、各工事の頻度によって変わるリスク値を算定、浮きタイルの算定方法は高層棟がゴンドラを使用しなければならないため、低層階の区画された壁面の全タイル枚数に対する浮きタイルの割合を参照とした。図 5 に各ケース (c1, c2, c3) の対象壁面が補修率 100% (工事終了) までの年数、補修率 100% になるまでに掛かる剥落による損害賠償金額を含めた費用の違いを示す。

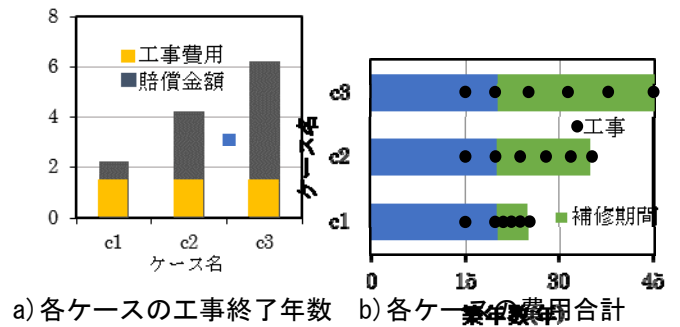


図 5 新宿校舎のリスク算定結果

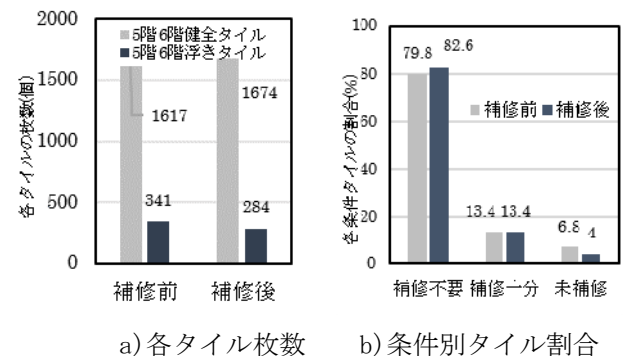


図 6 外壁タイルによる機械インピーダンスの計測

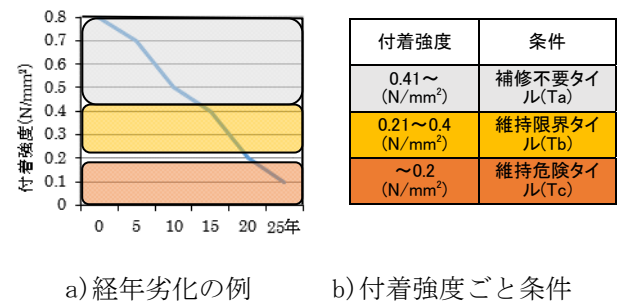


図 7 経年劣化と付着強度との関連図

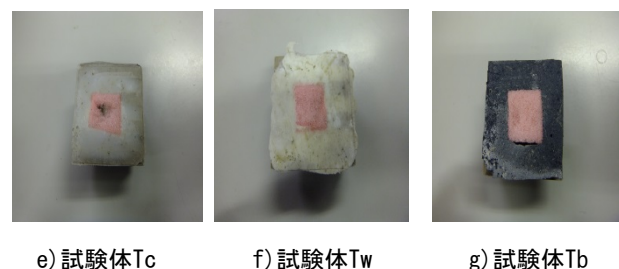


写真 3 接着材料と試験体の概要

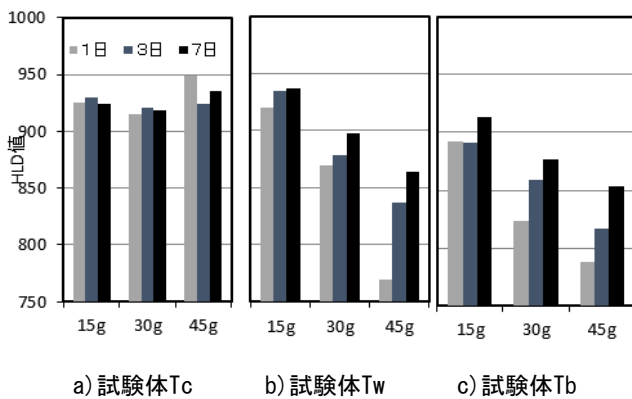


図 8 暴露試験体による機械インピーダンスの推移

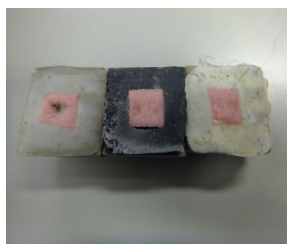


写真 4 空隙試験体

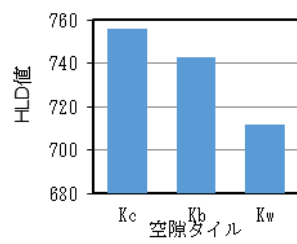


図 9 空隙試験体の HLD 値

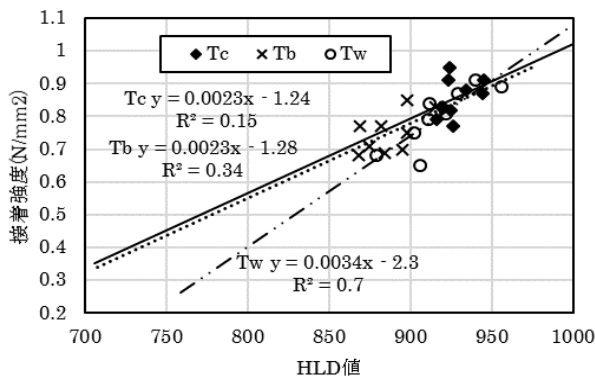


図 10 HLD 値と接着強度による接着強度推定式

4. 屋外暴露による接着強度試験（研究 4）

4.1 屋外暴露試験体の機械インピーダンスの変化

作成した屋外暴露試験体の 7 日間での機械インピーダンス（HLD 値）を写真 1 で示した小型反発度試験機で測っていく。その際タイル 1 枚につき 3 回の計測を行い、3 つの値の平均を参照データとする。また実験使用材料を表 2 に実験概要を表 3 に示す。7 日間の機械インピーダンスの計測では図 7 の試験結果を得ることができた。色による差としてクリアは 7 日間安定して 900～950 の値を取ったのに対して、ホワイトとブラックは値が安定しなかった。また、どちらも日が経つに連れて値が小さくなっていくのも確認でき、最終日にはクリア以外のすべてのタイルの値が 900 を下回ったことが確認できた。これらから推測できるのは、クリアには他の 2 者と違い顔料が含まれていない分、接着材料が他の 2 者より多く含まれていたことが挙げら

れ、それが要因となっていると推測できる。量による差はクリアに関してはほぼ一定といえるが、ホワイトとブラックについては量が増えると HLD 値が下がっていくことが予想される。

4.3 タイル試験体における空隙試験の概要

試験タイルとコンクリートの間にスポンジ（20×20×2mm）をはさみ浮きタイルを再現し、小型反発度試験機によって機械インピーダンス（HLD 値）の変化を調べていき小型反発度試験機の浮きタイルに対する有用性を確認する。その際に使用した接着剤は、屋外暴露試験と同様のシリコーン系の接着剤で色はクリア、ホワイト、ブラックの 3 種類である。結果を図 9 に示す。図 8 と比べるとスポンジを入れて浮かせた各タイルの HLD 値は下がっていることが分かる。また、HLD 値と引張り強度の計測により、下記の接着剤の色ごとの強度推定式が求められた。

$$\text{透明 (Tc)} \quad y = 0.0023x - 1.24 \quad (1)$$

$$\text{白 (Tw)} \quad y = 0.0034x - 2.3 \quad (2)$$

$$\text{黒 (Tb)} \quad y = 0.0023x - 1.28 \quad (3)$$

なお、 x =HLD 値 y =引張り強度（N/mm²）とする。

5. まとめ

本研究では補修工事の現状についての確認が出来た。費用によって補修を十分に行うことが出来ず次回に持ち越すことがあり、施主側には保有リスクとして乗っている。また、浮きタイルの確認方法として今までの打音法による確認よりも、小型反発度試験機による機械インピーダンスの計測による確認に有用性があると予想出来る。そして弾性接着剤の中にも顔料などの影響による接着性能の違いがある事を確認することが出来た。

参考文献

- 1) JIS A 5209 セラミックタイル, 2013 年
- 2) JIS A 8051 リスクアセスメント, 2014 年
- 3) 一般社団法人タイル業協会 東北地方太平洋沖地震外壁タイル調査報告書-2014 年
- 4) コニシ株式会社 BOND BEST SYSTEM
- 5) 日経アーキテクチュア 落ちない外壁タイル -2014-7-25

謝辞

本研究の実施にあたり工学院大学新宿校舎施設課関係各位、工学院大学高層棟・中層等外壁タイル補修工事関係各位より多くの助力を賜り感謝致します

既存建物の非構造・天井部材における補修モデルに関する研究

～木摺り漆喰天井部材の補修工法～

*岡健太郎, **田村雅紀, ***後藤治

1. はじめに

近年、建築物の長期使用や長寿命化を考える際に、材料レベルでの力学特性や耐久性などの狭義の品質に加えて、損傷率、故障率、安全性を含めた広義の品質として捉え、平常時・災害時の時間変化を含む使用環境を考慮した品質の確保に向けた動きがある¹⁾²⁾。このような状況下で建築物全体の品質を考えると、地震等の外力に対する耐震性を満足するために多くの規基準が設けられている構造部材に対して、その内外に付加される仕上材料は、居住性や美観性、躯体の保護等の多様な性能が要求されるものの、耐震性を含めた観点から、要求性能の確認が十分になされているわけではない。

実際、東日本大震災では多くの建築物で外装材や天井材等の非構造材の崩落事故が発生した³⁾。また昨今は、平成 26 年に施行された建築基準法施行令 39 条をはじめ、天井材等の非構造部材の落下における安全対応策の指針の制定など、構造材及び非構造材を包括した建築物の耐震性能を再考する状況になっている。それらを踏まえた対策として、既存建築物における天井部材では、天井材の直天井化や軽量化、新規の工法による施工がいくつか提案されている⁴⁾。

一方で、長期使用した歴史的建築物及び文化財化した建築物においては、100 年を超えて長期使用されているものや地域性に伴う固有の影響などにより、JASS 等の指針等で体系化されていない工法で施工された非構造材が及ぼす耐震性の低下に関わる影響があることに加えて、文化的・歴史的観点や当時の技法の個性から意匠や材料の変更を含めた補修や改修が困難な部位があることも考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、文化財建築物で多用される漆喰仕上げによる左官材料に着目する。これらは、天井だけでなく内外壁など広範囲に適用されている上、特色ある技法で施工された建築物が今日でも全国に数多く使用されている状況を鑑みて、長期に渡る使用の結果、ひび割れ・浮きが発生する段階まで劣化が進み、地震等の大きな外力によって、美観性が顕著に損なわれたり、安全性・耐久性・使用性の低下が生じる可能性がある。実際、長期使用された建築物で室内外の仕上材に損傷が発生すると、人的被害や躯体への影響の有無に関わらず、以降の安全性や部材補修の問題等で建築物ごと解体される事例があることから²⁾、災害時の安全性確保の観点に立脚した対応策を検討し、対象となる漆喰を用いた左官天井の健全度を把握し、補修等により性能改善を行う必要がある。

更に、現在の技術動向を概観すると、湿式の漆喰天井に限定すれば、JASS15 等の現行指針に概ね沿った形での再施工⁵⁾や、建築物の外壁補修技術を応用した漆喰天井の仕上

面側からの補強法⁶⁾などが検討・実施されているが、既存の左官天井部材下地の仕様が多岐に渡る傾向がある⁷⁾。松本らの報告⁸⁾では、多くの文化財建築における木摺り漆喰工法が適用された部材は、現行指針の JASS15 で提示されている寸法を上回る傾向があり、JASS15 の 2007 年版には「左官工事は適用可能な下地と仕上げの組み合わせが多岐にわたる」という文言があることから、同一の建築物であっても部材の劣化程度に差異が生ずることが考えられている。以上のことから、対象部材の劣化状況や保存価値（文化・歴史・技術・オーセンティシティ等）に適合した維持保全の手法を具体的に提示する必要がある。

そこで本研究では、既存左官部材の維持保全方法の一つとして、可能な限り既存材料を存置しつつも意匠の変更を伴わないことを念頭に置いた、下地側から実施する左官部材補修工法の開発を行う。特に本稿では、岩手銀行旧本店本館で使用されていた既存左官天井から採取した実部材を用いて、木摺り漆喰天井部材の剥離・剥落を抑制することを目的とした補修工法に関する基礎的検討結果を報告する。

2. 木摺り漆喰天井部材における補修工法の検討

2.1 木摺り漆喰工法の捉え方

表 1 に本論文で用いる木摺り漆喰工法に関する用語を示す。現段階において木摺り漆喰工法に関する報告は多くはなく、部材等の名称は明確に統一されているわけではない。以上のことから、本論文内では建築工事標準仕様書・左官工事「4.4 木ずり下地」（以下、JASS15）を参考に、本稿で取り扱う用語を整理した上で使用する。

本研究で扱う木摺り漆喰工法は、漆喰荷重の木摺り下地への機械的抵抗力と剥落抵抗性に加えて、漆喰自体が担保することが可能な抵抗力が相互に作用することで、部材としての強度が発現されると考えられる。従って、木摺り下地の目透かし部分に食い込んだ漆喰の引掛り及び、小幅板と漆喰の接触面における付着強さによる剥落への抵抗性を整理することが重要な要素となる。

表 1 本論文で用いる木摺り漆喰天井部材に関する用語

用語	分類	内容
木摺り下地	部材 ・ 部位	漆喰を塗り付ける下地部材
小幅板		木摺り下地に用いる木材
目透かし		下地に設けられる、漆喰が入り込む隙間
引掛り		形状を問わず、下地に塗り込められた漆喰が支持力を発生する形状になっているもの
食い込み	現象	目透かしへ漆喰が入り込むこと

2.2 補修工法開発のアプローチ

木摺り漆喰工法が適用された天井部材は、木摺り下地に対して下塗り、斑直し、中塗り、上塗りというように、うす塗りで層状に施工されることが多く、積層された漆喰の荷重は、1 層目に塗られる下塗り層が主に負担していると考えられる。また、同一の建築物で施工された部材であっても、小幅板の寸法や目透かしの幅にばらつきが多いと言われている⁷⁸⁾。さらに、既往の研究⁹⁾⁻¹¹⁾において、木摺り漆喰工法を適用した壁や天井部材の地震被害等による損傷は、漆喰層の剥落によるものが多いことが報告されている。特に剥落を起こした部材では、木摺り下地の目透かしから漆喰の引掛り部分が引き抜けて、下地の木部が露出する剥落性状が多い傾向がある⁹⁾⁻¹²⁾。漆喰層の荷重のほとんどは目透かし部分の引掛りが負担しており、下地と漆喰の接触面の付着強さは部材の支持力として寄与されにくいと考えられる。このことから、小幅板と漆喰の接触面における付着強さを当該補修工法によって改善することで、剥落に対する抵抗性を向上させることが求められる。

2.3 本補修工法で使用する樹脂

本稿で示す工法で用いられた樹脂は、コンクリート構造物の補修材や防錆剤として用いられる低粘度のアクリル樹脂（以下、樹脂）を応用したものであり、粘性をはじめ、浸透性や硬化時間など、施工状況に合わせた補修性能の調整が比較的容易であり、建築物ごとに異なる劣化の程度や、使用材料と施工方法に起因するばらつきが大きい左官部材に対して適用性が高いと判断された。

この樹脂は熱硬化性樹脂を主剤としており、12～16wt%の硬化剤を混合することでアクリルモノマー及びメタクリルモノマーからなる組成物(83～88wt%)の硬化体が形成される。また、流動調整用添加剤や硬化剤の種類、添加量を変えることで、硬化速度・粘度等の性状を比較的自由度高く制御することができる。なお、JIS A 6024 のエポキシ樹脂注入工法で主に用いられる低粘度形のエポキシ樹脂は 100～1000mPa・S の粘度を有するポリマーであるが、本工法で用いるアクリル樹脂は常温における常温の粘度が 80～100mPa・S の低粘度で、多孔質な材料に対して高い浸透性を有しており、硬化時間は 30 分～7 日程度まで制御できる。また、この樹脂は補修部位材料と混和して使用することも可能であり、本工法の一部では既調合漆喰と樹脂を同量混合したものを使用して、左官部材の物性に類似させている。

2.4 本補修工法の概要

表 2 に本研究における既存左官天井部材の補修手段の例を示す。まず、木摺り漆喰天井部材に対しては、劣化状況や部材・作業への負担軽減を含めた 3 種類の方法を検討した。3 工法の共通点としては、低粘度のアクリル樹脂を、天井部材の脆弱な部分へ注入・浸透させ、一体化させるものである。これら①～③の工法は、同一の部材であっても既存部材の健全度や施工状況に応じて混在させて施工することが可能であり、既存部材の保存性を高めたまま補修を行うことが可能である。

表 2 本研究における補修手段の例

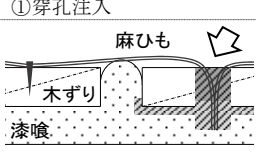
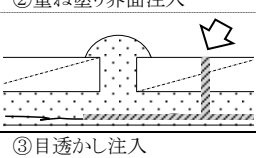
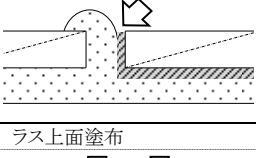
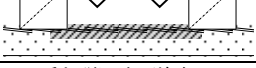
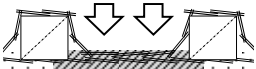
下地	補修断面図	用途
木摺り	①穿孔注入 	木摺りに約 φ10mm の穴を開け、樹脂を注入する方法。木摺りと漆喰の界面に大面積で樹脂を注入できる上、充填材によるアンカーの効果が期待できるので、補修効果は最も高いと考えられる。加えて、下地と支持部材を麻紐で締結することで、冗長性を付加させることが可能。
	②重ね塗り界面注入 	複数の層に塗り重ねて施工する漆喰部材の特性上、塗り重ね界面で剥離する可能性もあるので、その部分へ約 φ5mm で穿孔し、局所的に樹脂を注入して補修を行う方法。木摺りと漆喰の付着が比較的健全であった場合に用いる。
	③目透かし注入 	目透かしに沿って樹脂を流し込む方法。穿孔作業が必要なく、作業者の負担と天井部材への加工度が軽減できる利点がある。一方で、下地と漆喰の空隙、引掛り形状によって樹脂の浸透に差異が生じやすい方法でもあると考えられるため、今後も検証が必要である。
金属ラス参考)	ラス上面塗布 	左官天井は下地に金属ラスを用いているものも存在するので、本工法を発展させた形でラス下地の補修法も検討している。金属ラスは腐食した場合、下地ごと剥落する可能性がある。そこで、ラスの上面から樹脂を塗布すると同時に、既存天井の上部にラスを新規に覆い被せて天井部材の補強を図る方法を検討中であり、今後も試験を重ねる。
	ラス重ね張り+上面塗布 	

表 3 補修工法に関する実験の項目と内容

実験	試験体	要因	試験内容
1	小型模擬試験体	漆喰の調合 補修の有無、 漆喰層の塗り厚	JIS A 6909 付着強さ試験を参照し、小幅板と漆喰の接触面の付着力を補修・無補修で比較
2	既存部材	補修の有無、 加振方向、加速度	3次元振動台を用いて、加速度、加振方向毎に既存部材への影響を補修・無補修で比較

表 4 補修工法に関する実験の使用材料及び部材

実験	材料	記号	内容
1	水	W	上水道水
	消石灰	C	JIS A 6902 左官用消石灰
	細骨材	S	大井川産陸砂(粒度 2.0mm 以下、絶乾密度＝2.68g/cm ³ 、吸水率＝1.32%、F.M.＝2.83)
	すさ	F	アク抜き藁すさ(15mm 切) 密度＝0.5g/cm ³
	つのまた糊	-	本実験では使用せず
	アクリル樹脂	-	主剤:硬化剤＝100:4(質量比)で混合
	充填材	-	アクリル樹脂に同質量の既調合漆喰を混合
2	既存部材 1	M44	西側客溜まりから採取(明治 44 年施工)
	既存部材 2	S10	東側客溜まりから採取(昭和 10 年代施工)
	アクリル樹脂	-	主剤:硬化剤＝100:4(質量比)で混合
	充填材	-	アクリル樹脂に同質量の既調合漆喰を混合
	麻紐	-	6 本撚り 引張強度:240N 以上

従って、漆喰を塗り直す更新が回避でき、コスト削減が図られる可能性が高い。また、木摺り漆喰を部分的に施工する高度な技術への要求が軽減され、下地側からの補修によって、漆喰天井の仕上げを損なうような影響を生じさせる可能性が低い。

なお表 2 の下部に、金属ラス下地の左官天井の補修案を示す。これら 3 工法の発展形として、ラスの上面に樹脂を塗布する方法をはじめ、既存部材の上から新規にラスを重

ねて下地材を補強する方法などに展開が可能である。

2.5 穿孔注入による補修法について（工法①）

表 2 に示すように、実工事における再現性および拡張性の高い補修工法を目指しているが、現段階においては工法①が、工法②及び③の要素を含み、適用範囲が広く、補修効果の高い工法と考えられる。従って、本稿では工法①を中心とした実験結果を報告する。

3. 木摺り漆喰天井部材における補修工法の開発

3.1 本補修工法における付着強さ試験の概要（実験 1）

3.1.1 木摺り漆喰部材の小型模擬試験体について

表 3 に補修工法に関する実験の項目と内容、表 4 に補修工法に関する実験の使用材料及び部材、表 5 に小型模擬試験体の概要を示す。補修工法の基礎的検討に際し、木摺り漆喰天井部材を模した小型の試験体（以下、小型試験体）を試験室で作製した。木摺り漆喰天井部材において、漆喰の引掛りの脱落による損傷は、その部分の漆喰が最大強度に達する前に剥落する場合が多く、すき等の繊維状の含有物が多い材料の特性が発現されないため、引掛りが破断することによる破壊よりも脆性的な傾向を示す可能性がある。そこで今回は目透かしを省略した下地を用いて、漆喰調合を要因とした小幅板と漆喰の接触面における付着強さを評価する。また、同様の小型試験体に対して表 2 の工法①の方法で試験施工を行い、補修効果を確認する。小型試験体の作製及び保管は気温 20℃・湿度 60%を目指した試験室にて行う。今回は漆喰のすき含有率、砂含有率、水消石灰比を実験要因として、養生期間 24 日の若材齢にて強度試験を実施し、安全側に立脚した相対的な比較を行う。小幅板は小型試験体 1 基あたり 4 枚（幅 40×厚さ 12×長さ 200mm）使用し、受け材（天井材の野縁に相当）2 本（幅 30×高さ 40×長さ約 200mm）へ隙間なく並べ、小幅板の幅方向に釘を 1 ヶ所あたり 2 本ずつ用いて留付ける。最後に、漆喰の塗り厚に合わせて、下地の外周へせき板を取り付ける。なお、本実験では漆喰の塗り施工時に小型試験体の下地を架台から垂下することで実際の天井板の施工環境を模擬する。また、左官部材特有のコテ圧等の人為的な影響を生じにくくするため、小型試験体の作製は同一の作業者が実施し、塗り施工時と同様の向きのまま養生を行う。

3.1.2 無補修の小型試験体における調合要因の比較

小型試験体の養生終了後、架台から取りはずして仕上面を上に向けて置き、JIS A 6909 を参考に 40×40mm のフィラーアタッチメントの中央が、それぞれの小幅板の長手方向の軸に位置するように漆喰の仕上面へ装着する。つまり、1 枚の小幅板の上部にアタッチメント 1 つを配置する。次に、アタッチメントの外周に沿って漆喰層に切欠きを入れた後、試験機を取り付けて上向きの荷重を加える。漆喰層が下地から剥離したところで除荷し、最大荷重を記録する。なお、養生中に漆喰が剥落する試験体が一部確認され、付着強さが極めて小さいことも予想されたため、切欠きの際には漆喰層が揺れ動かないように木材で下方向に押さえつけて行

い、付着強さ試験の試験機は小荷重でも測定可能なデジタルフォースゲージ（0.01N～50N）を用いる。

3.1.3 補修を実施した小型試験体の付着強さ

今回の補修効果の確認は、左官天井における剥離・剥落抵抗性への安全側に立脚した補修効果の検証を行うため、表 2 の工法①に準じた方法を採用する。養生終了後、架台から小型試験体を取り外して仕上面を下に向け、小幅板の中心部分へ 1 枚あたり 1 箇所の樹脂注入穴（φ 10mm）を穿孔する。穿孔深さは、小幅板の厚み+漆喰塗り厚×0.5 とする。注入後の養生期間は、JIS A 1612 を踏まえ、かつ今回使用する樹脂で制御できる最長硬化時間の 2 倍の 14 日とする。養生終了後、無補修試験体と同様の方法で試験を行うが、補修試験体では最大荷重 10kN の試験機を用いて、下地と漆喰の付着強さを測定する。

3.2 本補修工法における振動実験の概要（実験 2）

3.2.1 評価対象建築物及び既存部材の採取

表 3 に実験項目と内容を、表 4 に使用材料及び部材を、表 6 に既存部材の評価対象建築物の概要を示す。既存の漆喰天井部材における検討に際して、岩手銀行旧本店本館（1911 年、辰野金吾・葛西萬司設計）の復原工事に併せて、既存の木摺り漆喰天井部材（以下、実構造部材）を約 1m 四方で実際に切断・採取した。この建築物は昭和初期に吹き抜け部分への増床や間仕切の増設等の改造が施されていたため、今回の復原にあたっては、撤去予定の天井部材の一部を採取することができ、本実験における実構造部材として活用した。

表 5 小型模擬試験体の概要

項目	内容
形状・寸法	木摺り下地を模擬 仕上面寸法：約 200×200mm
小幅板	杉荒材（厚さ 12×幅 40×長さ 200mm） 4 枚/1 基
受け材(野縁)	杉角材（幅 30×高さ 40×長さ 200mm） 2 本/1 基
釘	鉄釘(20mm) 小幅板の幅方向に 2 本ずつ 16 本/1 基
目透かし	なし（小幅板と漆喰界面の付着強さを評価）
せき板	漆喰塗り厚に合わせて下地の側面に取付け
漆喰の調合	水消石灰比 W/C（質量比）：75%、85%、90% すき含有率 F/V（体積比）：2、4% 砂含有率 S/V（体積比）：0、20、40%
漆喰塗り厚	約 10、20、30mm
作業方向	上向き（天井施工時の環境を模擬するため、漆喰仕上面が下向きになるように型枠を吊り下げる）
養生環境	気温 20℃、湿度 60%、養生期間 24 日 （実建物の天井施工時と同様、仕上面は下向き）

表 6 既存建物の非構造天井部材の評価例とする対象建築物の概要

名称	岩手銀行旧本店本館（国指定重要文化財）
設計	辰野金吾 葛西萬司
竣工	明治 44(1911)
構造	壁 体：煉瓦造(イギリス積み) 小屋組：木造トラス構造
調査箇所	木摺り漆喰天井
備考	2012 年に銀行用途廃止のち、2016 年まで耐震・修復工事を実施、以降は資料館・イベントスペースとして活用

表 7 実構造部材における試験施工の流れ

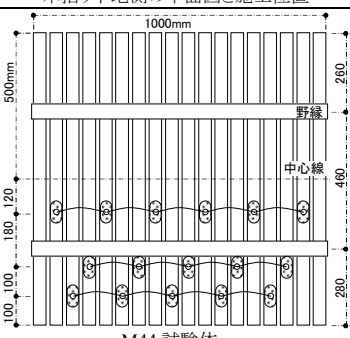
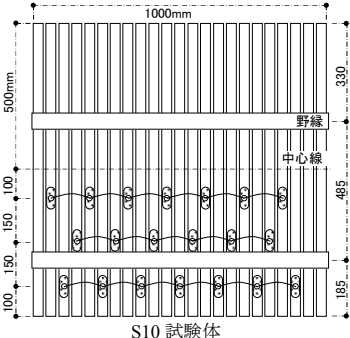
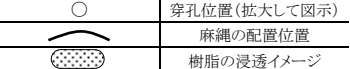
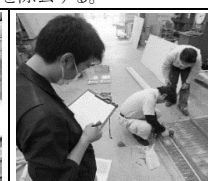
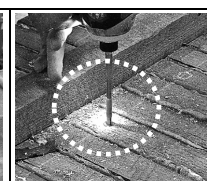
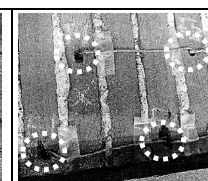
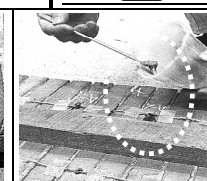
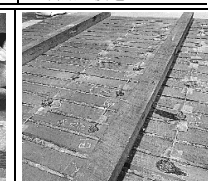
工事仕様		試験施工の流れ	木摺り下地側の平面図と施工位置
A: 施工前 の確認	劣化状態 の評価	試験体の仕上面を上に向けて床に置き、小幅板の痩せ、浮き等の健全度を確認する。目視、非破壊試験、貫入試験など。加えて、小幅板や漆喰の厚さ等、対象部材の仕様を可能な限り把握する。今回の試験施工では、既存天井を切断した実構造部材を用いたので、切断面の観察による小幅板の厚さや、漆喰の塗り厚も確認する。	
	寸法等の 仕様の 確認	参考値として、実構造部材 2 体のそれぞれの質量と小幅板 1 枚毎の幅、目透かし幅も測定した。各試験体の全体質量は、複数の電子はかりの上に試験体を載せ、各はかりが表示した質量を合計して算出する。木摺り下地部分の質量は、測定した寸法情報を基に体積を求め、下地に使用されている杉材の密度 (0.38g/cm³) を乗じて算出し、その値を全体質量から差し引いた結果を漆喰部分の質量とした。木摺り下地や漆喰層の寸法などはノギスを用いて小数第 2 位まで測定する。小幅板の幅、厚さ、目透かし幅は測定部分が試験体毎に 20 か所程度あるため、1 箇所につき 2 回ずつ測り、平均値を採用する。また、試験体毎に各条件の部材寸法の平均値と変動係数を求める。	
B: 穿孔 の 検討	位置	下地側を上に向けて床に置き、樹脂の注入に必要な穴の位置を予め木摺り下地にチョーク等でプロットする。今回は、補修の有無を実験要因にしているため、各実構造部材の半分を補修領域とする。また、2 つの試験体で野縁の位置が異なるため、小幅板方向の間隔は試験体毎に決定することとし、1 枚の小幅板に 2 つ以上の穴を設けないような配置とする。（右図参照）	
	深さ	確認した部材の厚さを基に、穿孔深さの目標を検討する。今回は、木摺り+漆喰塗り厚×0.5 とする。	
C: 穿孔 作業	穿孔	小幅板のめくり上がりや漆喰層の貫通に注意しながら、所定の深さまで穿孔を行う。今回は穴の底部を平坦にするため、フォスナービットを用いる。ドリルは漆喰層に達すると、穿孔速度が急激に早くなるため、ドリルビットに部材厚さの目安をマークしておき、こまめに穴内部の状況を確認する。また、樹脂の浸透に影響が出るため、穴内外に残存する削りカスをブロワーや掃除機で除去する。	
	1 次注入	1 回目の樹脂を注入する。注入量は、穿孔した穴の体積と同量とする。	
D: 補修 処理	2 次注入 以降	浸透状態は穴内部の樹脂の光沢を目視で確認し、底部の露出をもって浸透終了とする。終了次第 2 次注入を行うが、1 次注入から 60 分経過後までには浸透状態に関わらず全ての穴へ 2 次注入を行う。その際も穴体積と同量の樹脂を準備するが、穴から溢れ出る場合はその時点で注入を中断する。樹脂の浸透が早い場合や、小幅板が揺れ動くような空隙がある部分は、樹脂の浸出に留意しながら 3 次注入も同様に行う。	
	麻紐の 挿入	樹脂注入後、速やかに麻紐を差し込む。麻紐は長さ約 10cm に予め切断した物を用意し、野縁と平行方向の隣接する穴へ縄の両端を挿入する。縄は、穴の埋戻しまで揺れ動くことの無いように、粘着テープ等で仮留めする。	
	充填材の 注入	対象部位の樹脂注入終了から 60 分以上経過したのち、樹脂と既調合漆喰を同質量ずつ混合した充填材を用いて、麻紐を固定しつつ穴を埋戻す。再度 60 分以上置き、充填剤の硬化を触診により確認してから、仮留めを除去する。	
作業の 様子		     	

表 8 実構造部材の仕様

	M44	S10
合計質量 (kg/m²)	23.31	37.29
木摺り下地 (杉材) 想定質量 (kg/m²)	4.88	5.66
漆喰層想定質量 (kg/m²)	18.43	31.63
木摺り本数 (本/m)	18	23
野縁太さ (mm)	52×52	56×56
木摺り小幅板 (杉材) の幅 (mm)	43～47	35～41
木摺り小幅板の厚さ (mm)	7.6～9.9	8.3～11
目透かし幅 (mm)	10～12	3～9
漆喰層 の構成 (mm)	下塗り	2～3
	斑直し	6～7
	中塗り	1～2
	上塗り	1
	合計	10～13
		18～22

3.2.2 実構造部材に対する試験施工について（工法①）

表 7 に実構造部材における試験補修の流れ、表 8 に実構造部材の仕様を示す。補修対象の部材は建築物ごとに仕様の差異が大きい傾向のある左官部材であるため、施工前の健全度評価や仕様の調査が必要である。今回の実構造部材に対する試験施工でも、最初に仕上面の劣化状態の確認を行ってから、試験体の仕上面を下に向け、試験体の大きさに切断した 20mm 厚のスタイロフォームの上に置いて補修

施工を行った。工法①の場合、表 7 右側の平面図のように、樹脂は小幅板に沿って広がり、小幅板と漆喰の接触面が平面的に接着されると考えられるが、床に置いて作業を行う場合、木摺り下地の自重が樹脂の浸透に影響を及ぼす可能性があるため、樹脂の注入時には注入部分直下のスタイロフォームを抜去し、小幅板と漆喰の界面が圧着されないようにした。また、下地側からの補修作業は仕上面の意匠が変更されないという利点があるものの、作業中における仕上面の状況把握が難しいという側面があるので、実際の建物で施工を行う場合は、仕上面の状況把握を行う手段を策定しておくことが必要となる。今回の実験でも施工後に仕上面を確認したが、施工の影響によるひび割れの増加や樹脂の浸出は認められなかった。

3.2.3 本補修工法の振動実験による性能評価（実験 2）

前述の 3.1 項の試験を発展させ、補修効果を含む剥離・剥落抵抗性を部材単位でも評価するために、3 次元振動台による振動実験を実施した。表 9 に実構造部材への振動実験の入力波の種類と順番、写真 1 に加振フレーム、写真 2 に実構造部材の取付け状況を示す。実験を行うにあたり、天井板の野縁を挟み込むように鋼材の治具を圧接し、振動台上の加振フレームに吊り下げた。今回の実験では、天井を吊

り下げる治具及び加振フレームを全て鋼材で作製し、試験対象の部材以外が十分に剛体であると仮定した上で、入力波が部材に対して直接作用するようにした。また、試験体を吊り下げた後に表 7 右図の試験体中心線にそって漆喰層に切り欠きをいれ、補修の有無による影響を確認するための縁切りを行った。入力波は天井板の損傷状況や加振目的によってその都度決定したが、段階的に入力加速度が大きくなるようにした。なお最後に加振した M44 はすべて 900gal 以上の加速度を入力したが、これは先に試験した S10 が 900gal 以上でも顕著なダメージが認められなかったことを踏まえ、1 回目から大加速度を与えても大きな影響は与えないと判断したためである。

表 9 実構造部材への振動実験の入力波の種類と順番

部材	順番	入力波(gal)	周期(Hz)	時間(s)	加振方向
S10	1-1	300	2.5	120	Z 軸
	1-2	600		60	
	1-3	890			
	1-4	980	5		120
	1-5				
	1-6		2.5	600	Z 軸
	1-7				
M44	2-1	980	2.5	180	Z 軸
	2-2			300	
	2-3				

表 10 実構造部材の加振段階ごとの状態

部材	順番	入力波(gal)	加振後の部材の状況
S10	1-1	300	仕上り面のひび割れ進展は無く、剥落も発生せず。
	1-2	600	木摺り下地と漆喰の界面剥離が若干進行する。
	1-3	890	仕上り面のひび割れ進展は無く、剥落も発生せず。木摺り下地と漆喰の界面剥離がさらに進行し、漆喰層の浮きが目視で認識できる箇所が増える。補修の有無による剥離程度に差異が生じ始める。
	1-4	980	仕上り面のひび割れ進展は無く、剥落は発生せず。
	1-5		無補修側において、小皿板がそり上がって漆喰と剥離している箇所が認められる。その部分における漆喰の引掛りは、目透かしから抜ける形態となる。
	1-6		
	1-7		
M44	2-1	980	仕上り面のひび割れ進展は無く、剥落は発生せず。
	2-2		木摺り下地と漆喰の界面に剥離は認められず、補修側、無補修側の顕著な差異は確認されなかった。S10 よりも漆喰層が薄く、自重が軽いことに加えて、目透かし部分の引掛りによる支持力が大きかったためと考えられる。
	2-3		

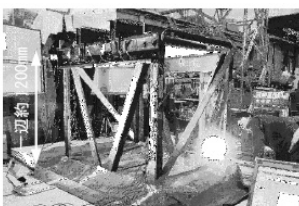


写真 1 加振フレーム



写真 2 実構造部材の取付け状況

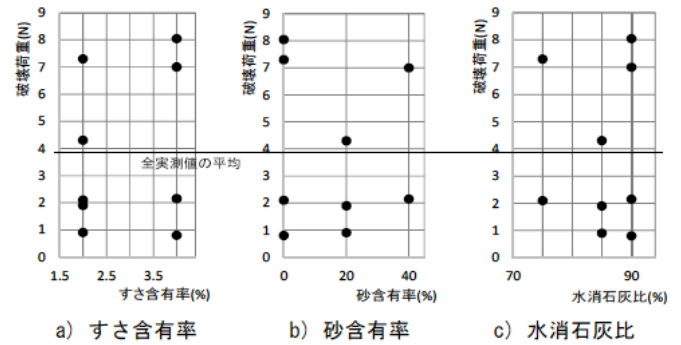


図 1 条件ごとの無補修の小型試験体の付着強さ試験結果

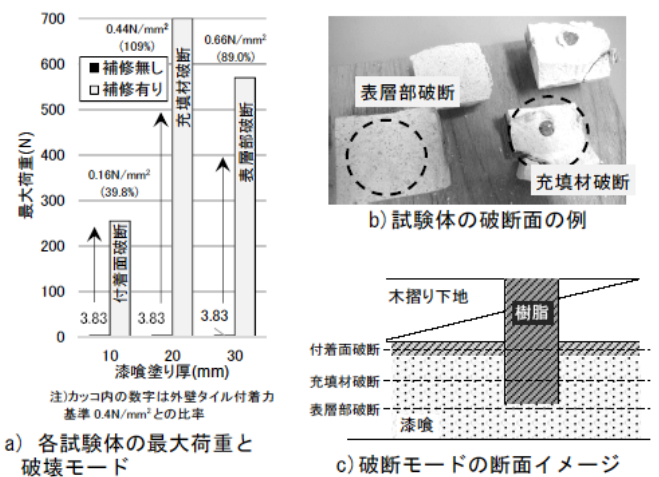


図 2 補修を実施した小型試験体の付着強さ



写真 3 S10 の最終加振後の各断面

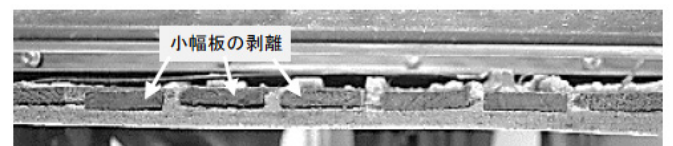


写真 4 M44 の最終加振後の各断面

4. 木摺り漆喰天井部材における補修工法の性能評価結果

4.1 本補修工法の付着強さ試験による性能評価（実験 1）

4.1.1 無補修の小型試験体における調査ごとの比較

図 1 に条件ごとの無補修試験体の付着強さ試験結果を示す。実験の結果、各試験体の最大荷重の全平均は 3.83N であり、単位面積あたりの抵抗（ 0.0024N/mm^2 ）で評価すると、外壁タイルの付着強さ基準 0.4N/mm^2 と比較して約 0.6% の値となっていた。漆喰調査による強度と木摺り下地の仕様に関する報告¹³⁾では、すき含有率が増加すると漆喰の曲げ、剪断強度共に増加し、目透かし幅と付着強さに相関関係が認められたが、目透かしを省略した下地においては、小幅板と漆喰の接触面における付着強さに、調査との相関関係は確認されなかった。加えて、養生中に漆喰が剥落する試験体もあったため、安全側に立脚した場合、小幅板と漆喰の接触面における付着強さは剥落の抵抗要素として期待できないことが改めて確認できた。以上のことから、目透かし部分の引掛りを考慮しない場合、小幅板と漆喰の接触面における付着強さは調査による影響は大きくなく、脆弱的な破壊を示す部分であると言える。

4.1.2 補修を実施した小型試験体の付着強さ

図 2 に補修を実施した試験体の付着強さを示す。前述の実験における木摺りと漆喰の界面において、付着強さと調査との因果関係が認められなかったため、本論文では 4.1.1 における最大荷重の平均値（3.83N）を用いて比較を行った。実験の結果、最大荷重は無補修の試験体と比較すると少なくとも 66.5 倍の付着強さの向上が認められた。漆喰と木摺りの界面で剥離することはなく、漆喰層における破断モードは図 2 c) に示す 3 つに分類できた。各破断モードで最大荷重にばらつきはあるものの、無補修の試験体と相対的に比較した場合、漆喰の荷重を負担する箇所として考慮できなかった木摺りと漆喰の界面に、剥落への抵抗性を高められることが分かった。

4.2 本補修工法の振動実験による性能評価（実験 2）

表 10 に実構造部材の加振段階ごとの状態を、写真 3 に S10、写真 4 に M44 の最終加振後の無補修・補修側の各断面を示す。本検討における振動実験では、最終的に両天井板とも 980gal で加振を行ったが、仕上面のひび割れ進展は目視では認められず、剥落も発生しなかった。特に M44 は S10 と比較して漆喰層が薄く自重が軽いことに加え、施工状況が良好である故、木摺りと漆喰界面の顕著な剥離は認められず、無補修側、補修側共に十分な付着が保たれた。

一方で S10 は、無補修側よりも補修側の剥離幅が小さく、本補修工法による効果が認識される結果となった。また、今回は考慮していない木摺り下地の変形が発生した場合、下地の変形に追従できない漆喰層が剥落する可能性があるため、検討の余地がある。しかしながら、本試験では剥落こそしなかったものの、漆喰の引掛りが目透かしから引き抜けることにより、鉛直方向の支持力を低下したとみられる箇所があり、そのような部分は周辺の漆喰層が曲げや剪断応力を負担しているので不安定な状態といえる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 文化財建築物の既存の木摺り漆喰天井部材において、下地側から小幅板と漆喰の界面へ浸透性アクリル樹脂を注入する補修工法を開発した。この補修により、無補修の部材と比較して小幅板と漆喰の付着強さが少なくとも 66.5 倍向上し、漆喰の剥落への抵抗性を高められることを示した。
- 2) 目透かし部分の漆喰の引掛りによる支持力を排除した試験の結果、小幅板と漆喰の接触面の付着強さは、漆喰の自重を負担する要素として期待できないことが確認できた。この結果より、抵抗力の不足によって脆性的な剥落を起こす要因となりうる可能性がある。そのため、既存の木摺り漆喰天井部材を現状のまま活用する場合は、木摺り下地と漆喰の接触面における付着強さを高める補修を選択肢に含める必要がある。
- 3) 実構造部材に補修を施して最大 980gal の振動実験を行った結果、S10、M44 の両試験体とも、木摺り下地と漆喰の界面剥離が抑制されると共に、補修部分における漆喰引掛り部分の切断や目透かしからの脱落が抑制された。今後は、天井部材の変形を考慮した試験を重ねて行い、実構造物により近い条件で引続きデータ収集を行う。

謝辞

本研究は株式会社樹丸山紘明氏及び株式会社ジャスト横島順一氏との共同研究であり、貴重なご助言を賜りました。また、実験の実施に際しまして、工学院大学山下哲郎教授をはじめ関係各位に多大なご助力を賜りました。

参考文献

- 1) 田村雅紀，野口貴文，友澤史紀：コンクリート構造物における環境側面と社会ニーズ抽出手法に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.1501-1506，2005.6
- 2) 岡健太郎，田村雅紀：構造物の災害対応を含めた LCM 戦略，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集，Vol.14，pp.295-302，2014.10
- 3) 日本建築学会：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，丸善出版，東京，2011.7
- 4) 日本建築学会：天井等の非構造材の落下に対する安全対策指針・同解説，丸善出版，東京，2015.1
- 5) 齋藤榮，李榮蘭，榊田佳寛，小西敏正：歴史的建築物明日館の修復・保存における左官工事について，日本建築学会技術報告集，Vol.18(40)，pp.1117-1120，2012
- 6) 杉江夏呼，永井香織，西谷章，古谷誠章：早稲田大学 2 号館(旧図書館)保存改修工事 その 1 建物概要と旧閲覧室の漆喰天井補強，日本建築学会学術講演梗概集 2011，pp.849-850，2011.7
- 7) 源愛日児：木造軸組構法の近代化，中央公論美術出版，2009.8
- 8) 松本直之，藤田香織：近代木造建築の外周壁構法に関する研究 その 5 木摺下地の寸法と仕様に関する文献調査，日本建築学会学術講演梗概集 2015，pp.441-442，2015.9
- 9) 松本直之，藤田香織：近代木造建築の地震被害に関する研究 平成 23 年東北地方太平洋沖地震による振動被害を事例に，日本建築学会学術講演梗概集 2013，pp.339-340，2013.8
- 10) 松本直之，藤田香織：近代木造建築の外周壁構法に関する研究 その 4 旧伊達郡役所の静的増分解析と地震被害との比較検証，日本建築学会学術講演梗概集 2014，pp.131-132，2014.9
- 11) 岩田昌之，津和佑子：天井部材の構造安全性について，文建協通信(121)，pp.33-41，2015.7
- 12) 田邊平學，後藤一雄，菊田守雄：交番水平荷重を受くる木造有壁骨組(大壁)の實驗，建築學會論文(13)，pp.210-219，1939.4
- 13) 岡健太郎，田村雅紀，後藤治：建築物の LCM における維持保全と保存的活用ストラテジー その 5，建築学会梗概集，2015.9

超高層ビルの構造・非構造部材における要素材料の補修モデルに関する研究

～アクティブ赤外線サーモグラフィ装置を用いたコンクリートのひび割れ深さ検出～

佐藤勇太*, 田村雅紀**, 岡健太郎***

1. はじめに

コンクリートは塩害や中性化、凍害、乾燥収縮などの経年劣化や施工不良、災害の被害による浮きや剥離、ひび割れ等の劣化につながるので維持管理が必要である。コンクリートの浮きや剥離、ひび割れにより美観を損なう、構造物内へ漏水、構造耐力を損なう、鉄筋の腐食等が原因となり、補修工事が行われている。その補修工事を行う際には建物の劣化を調査し補修箇所を特定する必要がある。

そこで、補修工事を行う前の検査の方法として、破壊を伴う検査と非破壊による検査がある。本研究で用いた赤外線サーモグラフィ装置は非破壊による検査を行うことが可能である。赤外線サーモグラフィ装置は非破壊検査では主に建物の大きな面を撮像し健全部と劣化部の温度変化の違いから劣化箇所を発見するために用いられる。赤外線サーモグラフィ装置を用いた検査でひび割れの劣化をより詳しく調査できないかと考え研究を行うことにした。

そこで、本研究では研究 1 でコンクリート構造物の劣化、特にひび割れによるものについての調査。ひび割れと鉄筋との関係性について調査を行う。研究 2 でコンクリート構造物である図 2a) の工学院大学八王子校舎 15 号館のひび割れ調査、温度変化の調査を行い、コンクリートの模擬ひび割れ試験体をひび割れ幅や深さ、明度の違いのあるものをつくり劣化を評価し、赤外線サーモグラフィ装置とコンクリート構造物のひび割れとの関係性を評価する(図 1)。

2. 実験概要

2.1 工学院大学八王子校舎 15 号館現地報告書による調査

表 2 の文献調査に示すように、既往の工学院大学八王子校舎 15 号館現地調査報告書をもとに、コンクリート構造物である工学院大学八王子校舎 15 号館の劣化を確認した。そこで、図 2a) の写真で確認できるように、内外壁 P コン穴埋めモルタルの剥離、外壁の汚れ、防水の仕上げモルタルの剥離、コンクリート面のひび割れ等の問題を抱えていることが確認できた。今回の調査報告書によるとひび割れに関しての補修は行われず、P コン穴埋めモルタル、仕上げのモルタルの補修が行われる。そのため、さらに明確な補修箇所を特定することができるのではないかと考え、今回本実験では赤外線サーモグラフィ装置により、コンクリート面のひび割れと熱的溫度変化の関係性について研究を行う。

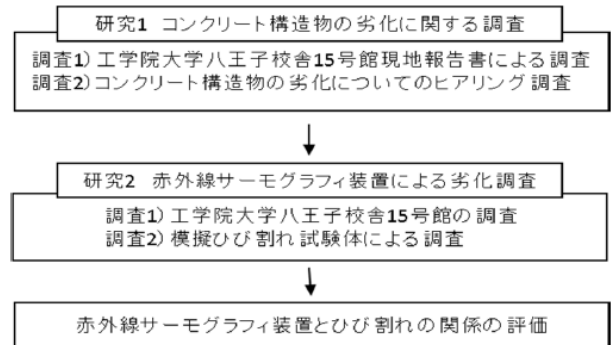


図 1 研究の流れ

表 1 使用材料

	項目	材料	種類
八王子校舎 15 号館	普通コンクリート	セメント	普通 PC
		粗骨材	川砂利又は碎石
		細骨材	川砂又は山砂
		混和材	AE 減水材
試験体	普通コンクリート	セメント	普通 PC、ブリージング防止用ジェットセメント混和
		粗骨材	青梅産砂岩碎石、密度 2.59 g / c m3
		細骨材	大井川陸砂、密度 2.64 g / c m3
		混和剤	AE 剤、AE 減水剤

表 2 実験水準と要因

		実験要因	水準
研究 1	調査 1	文献調査	工学院大学八王子校舎 15 号館 現地調査報告書
	調査 2	ヒアリング調査	コンクリート構造物の劣化
		要求区分	安全性、耐久性
研究 2		八王子校舎 15 号館調査	ひび割れ幅(mm)、温度変化(℃)、ひび割れ深さ(mm)、水分量(%)
		模擬ひび割れ品質評価	圧縮強度、割裂引張強度、ひび割れ幅(mm)、温度変化(℃)、ひび割れ深さ(cm)、水分量(%)
		測定内容	水分量(%)、温度(℃)、



a) 工学院大学八王子校舎 15 号館



b) 劣化箇所写真

図 2 調査対象建物

2.2 コンクリート構造物の劣化に関してのヒアリング調査

一度工学院大学八王子校舎 15 号館の調査を行っている大成建設の方にコンクリート構造物の劣化についてヒアリング調査を行った。コンクリート面にひび割れがあると

き、その幅や長さについてはクラックアイを用い、ひび割れの幅を計測し補修を検討する。その補修方法は基本的に 0.2mm 以下の場合シール材を塗る。それ以上のひび割れ幅の場合は、Uカットシール材により補修が行われる。これらの補修方法の区別としては補修材料がひび割れに入り込むか入り込まないかという基準でわけている。また、目視でより目立つひび割れに関しては構造的に問題がないか構造設計者の確認、調査を行う場合もある。1mm 以上のひび割れがみられた場合には構造設計者の確認など深く追求されることが多い。また、柱や外壁など重要度の高い部位は特別な補修方法を設けているということもなく基本的にひび割れ幅の大きさをもとに判断し補修が行われる。しかし、壁の両側に同じようなひび割れが入っている場合はひび割れが壁面を貫通して入るため危険なひび割れとして判断する。また、補修を考慮するひび割れは基本的には外部に面する雨水のかかる箇所に発生したひび割れで建物内の壁面のひび割れは特別要望がない限り補修することはない。現在、ひび割れが鉄筋まで到達しているかの判断は雨水が鉄筋まで到達し錆びることによって出た錆汁があるかないかで判断することが多いため、コンクリート内の鉄分と雨水が反応し出た錆汁との正確な判断はできていないことがある。そのため、ひび割れ深さ、ひび割れが鉄筋まで到達しているか分かることができればその後の補修や改修に非常に役に立つことが分かった。

3. コンクリートのひび割れの熱的調査

3.1 工学院大学八王子校舎 15 号館に関する調査

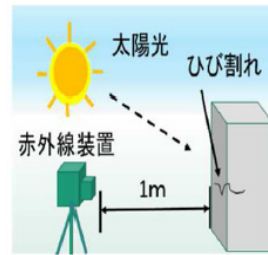
表 2 に示すように、実構造物である工学院大学八王子校舎 15 号館の屋上コンクリートを対象に実験を行った。

測定方法は、NDIS 3428 の規定にもとづきアクティブ法での試験を行った。そのため水を吹きかけ意図的な冷却を行いその後の自然環境の中での温度変化を測定した。実験の流れはまず、対象物のひび割れに十分に水が入るよう水をかける。その後赤外線サーモグラフィ装置により温度変化を測定。色差計により明度と彩度の変化、水分計により水分量の変化のデータを取りこれらとひび割れ幅との関係性について考える。実験は 2016/7/1 外気温 27℃ の環境下で工学院大学八王子校舎 15 号館の屋上にて行った。実験環境は図 3 に示す。図 3a) は実験環境のイメージ図である。図 3b) は実際の実験環境である。また、ひび割れ箇所はひび割れ幅 0.4mm、0.75mm、0.5mm の 3 箇所と健全部のなかで、目視で色の違いが見られた①～④の 4 箇所のデータを比較する。図 4a) の赤外線画像は測定箇所に水をかけた際の画像である。図 4d) は水をかけてから 100 分

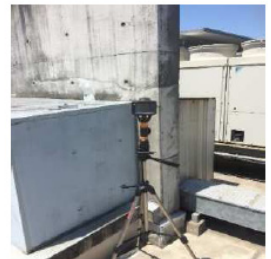
後の画像である。図 5b) は測定した結果をグラフにまとめた。図 4a) の画像からひび割れ箇所は、健全部に比べ色が明るいため温度が高いことが分かる。ひび割れ箇所が全体的に健全部より温度が高いのはコンクリート表面が水で

表 3 実験項目と方法

		項目	方法
研究 1	調査 1	文献調査	工学院大学八王子校舎 15 号館現地調査報告書
	調査 2	ヒアリング	コンクリート構造物の劣化についての聞き取りひび割れ箇所の劣化判断方法、ひび割れ箇所の補修方法についての聞き取り
研究 2	実構造物	八王子 15 号館	赤外線サーモグラフィ装置による温度変化の測定
	模擬ひび割れ試験体	試験体作成	円柱供試体割裂により半分に割りひび割れ深さの違いを作る。ひび割れ幅、深さ別試験体は銅板またはステンレス板を差込み計 12 種類のひび割れを作成する。
		圧縮試験	アムスラー式圧縮試験機にて圧縮強度、割裂引張強度を測定
		品質調査	圧縮強度、割裂引張強度、ひび割れ幅(mm)、温度変化(℃)、ひび割れ深さ(mm)、水分量(%)



a) 実構造物実験風景イメージ

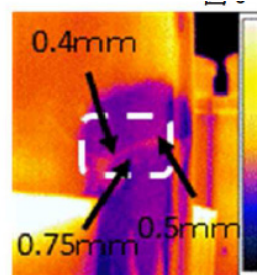


b) 実構造物実験風景

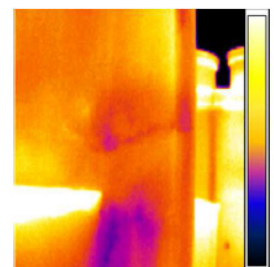
a) 実構造物実験風景イメージ

b) 実構造物実験風景

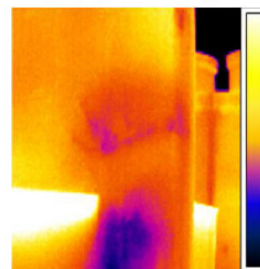
図 3 実構造物の実験環境



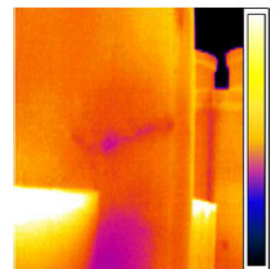
a) 水吹きかけ時



b) 測定開始から 20 分後



c) 測定開始から 60 分後



d) 測定開始から 100 分後

c) 測定開始から 60 分後 d) 測定開始から 100 分後

図 4 実構造物の赤外線画像

やされて温度低下したのに比べ、ひび割れ内にある空気が冷やされるのに時間がかかっている。図 4d)の 100 分後の赤外線画像より健全部とひび割れ箇所の色が逆になりひび割れ箇所が健全部に比べ温度が低くなることから分かる。100 分後の結果でひび割れ箇所の温度が低くなっているのはコンクリート表面が太陽光により温められすぐに水が蒸発し温度が上昇していく温度変化に比べ、ひび割れ箇所はひび割れ内にある水が多く含まれるために蒸発しきるのに時間がかかり温度が上昇するのに時間がかかるためこのような結果になった。また、健全部の温度上昇が測定開始 10 分～20 分に比べ、ひび割れ箇所は 20 分～30 分で健全部がひび割れ箇所の温度を上回った。健全部の中でも図 6a)、d)に示す L^* 値の低い、色の黒い箇所は温度が高くなることも確認できる。図 5a)に示すように、含水率に関しては測定開始 10 分後には健全部の値が急激に小さくなる。温度変化のグラフと比較してみても 10 分～20 分に温度が上昇していくので含水率との関係性は大きいことが分かる。ひび割れ箇所については、健全部ほど急激な変化はみられず緩やかな右下がりのグラフになっている。

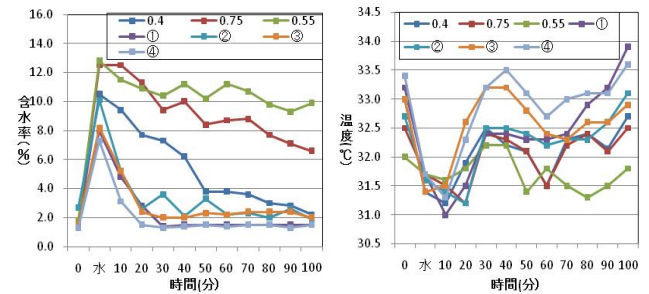
3.2 円柱供試体割裂による模擬ひび割れ試験体による調査

ひび割れ幅だけでは劣化度を測ることが難しいため、本研究ではひび割れ深さに違いのある試験体により調査を行う。試験体をアムスラー式圧縮試験機により一度半分に割る。割ったものをひび割れ深さの違いができるように、断面を斜めに二等分し、二等分した片側に接着剤をつけ貼り付け模擬ひび割れ試験体を作成する。ひび割れ幅は 1mm でひび割れ深さは 0～100mm のひび割れができる。

測定方法は NDIS 3428 の規定にもとづきアクティブ法により行う。まず、試験体に水を吹きかけ冷却する。しかし、今回は赤外線ランプを照射し測定中一定の距離から模擬ひび割れ試験体に熱を与え続け意図的に、温度変化を生じさせるアクティブ法により行う。また、今回の実験は日射の無い場所で行った。実験の流れとしては、まず試験体に十分に水が染み込むよう水をかける。水を十分に染み込ませた後、赤外線ランプにより模擬ひび割れ試験体を照射し加熱させる。加熱され温度が上昇していく様子と水分量の変化を赤外線サーモグラフィと水分計で測定する。

結果、実構造物を対象にした実験の結果と同様に温度変化からひび割れ箇所を検出することはできた。図 8 の赤外線画像を確認すると、健全部とひび割れ箇所は色の違いにより判断することができる。図 8a)の測定開始時の画像では、ひび割れ箇所が明るい色を示し特定することができる。図 8b)の水を吹きかけた際の赤外線画像もまた a)の時と同様ひび割れ箇所が健全部より明るい色を示しているため

ひび割れを確認できる。図 8c)の測定開始から 60 分後の赤外線画像は健全部に比べひび割れ箇所の色が暗くなっている。この時に健全部の温度上昇に比べ、ひび割れ箇所の温度上昇が遅いためこのような結果になった。



a) 実構造物の含水率変化 b) 実構造物の温度変化

図 5 実構造物の含水率、温度変化

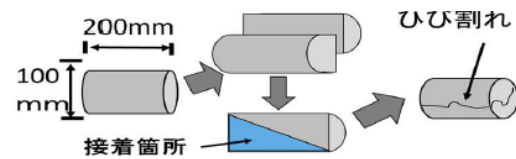
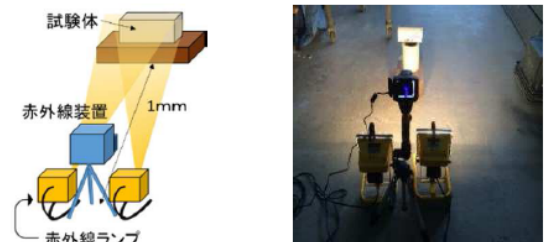


図 6 試験体作成方法



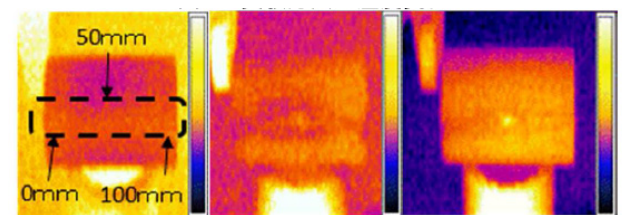
a) 試験風景イメージ

b) 試験体実験風景

a) 試験風景イメージ

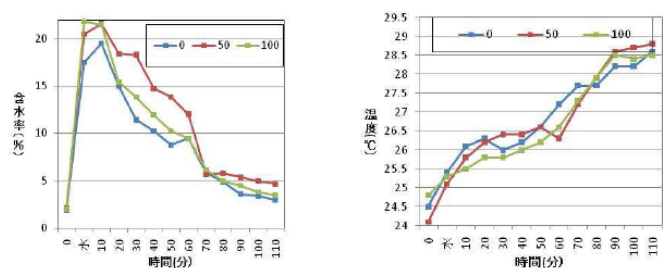
b) 試験体実験風景

図 7 実験方法と温度変化



a) 測定開始 b) 測定開始から 60 分 c) 測定開始から 110 分

図 8 円柱供試体による模擬ひび割れ試験体赤外線画像



a) 試験体の含水率変化

b) 試験体の温度変化

図 9 円柱供試体による模擬ひび割れ試験体の試験結果

図 8d)の測定開始から図 9a)の含水率の変化を見てみるとひび割れ深さが 0mm の箇所はひび割れ深さ 50mm、100mm の箇所に比べ水吹きかけ時から測定終了まで一番低い値であったが、100mm の箇所を比べてみると 50mm の箇所の方が含水率の値は高い。図 9b)の温度変化のグラフではひび割れ深さ 0mm の箇所に比べひび割れ深さ 50mm、100mm の箇所は水吹きかけ後温度が低い。

3.3 ひび割れ幅・深さ別模擬ひび割れ試験体による調査

図 10a)にあるように角柱試験体に幅 0.1mm、0.3mm、0.5mm、1mm の銅板をそれぞれ深さ 2cm、4cm、6cm の深さの違いをつくり差込み、固まる前に引き抜き模擬ひび割れ試験体を作成する。試験体を測定方法は図 7a)にあるように実建造物の調査の際に行った時と同様に NDIS 3428 の規定にもとづきアクティブ法により行う。まず、試験体に水を吹きかけ冷却する。また、今回はその後赤外線ランプを使用し測定中一定の距離から模擬ひび割れ試験体に照射し熱を与え続け意図的に、温度変化を生じさせるアクティブ法により行う。測定結果は図 11、図 12 にあるように、ひび割れ幅、深さが大きくなるほど温度上昇は遅くなることが確認できた。ひび割れ幅 0.1cm の試験体では健全部との差もあまり見られず、補修の検討の目安となる 0.3cm 以上の試験体では差がみられるため補修検討の際の調査に用いることができるのではないかと考えられる。図 13 のひび割れ深さと幅の関連図では、ひび割れ幅を測り調査後、測定開始からの温度差を求める。その二つの情報からひび割れ深さが分かり、ひび割れ深さと幅、補修材料費の関係性を図にまとめたものである。

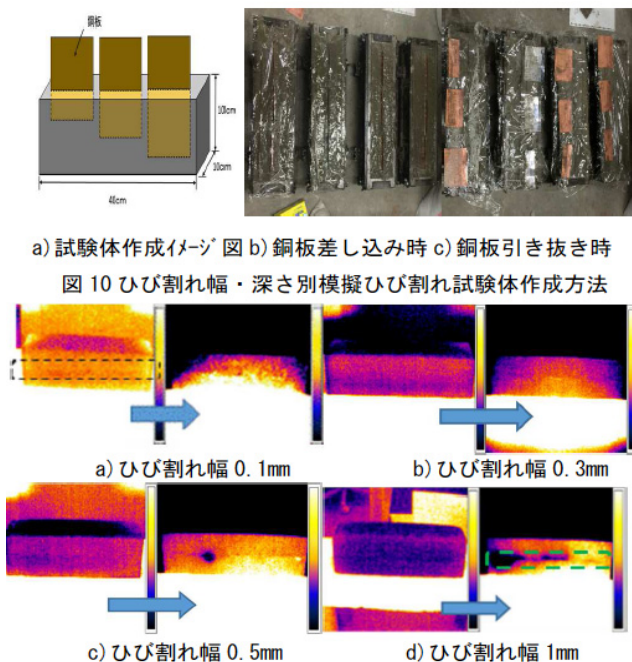


図 11 ひび割れ幅・深さ別模擬ひび割れ試験体赤外線画像

4 まとめ

- 1) 赤外線サーモグラフィ装置を用い、ひび割れ幅と深さの違いを読み取ることができ、ひび割れ補修に関わる外壁調査による一次診断の技術情報を検討した。
- 2) 外壁調査によるひび割れ幅と深さの関係から補修材料コストを求める関連図を作成した。

参考文献

- 1) 鉄筋コンクリート構造建築物劣化調査報告書
- 2) NDIS 3428 赤外線サーモグラフィ法による建築・土木構造物表層部の変状評価のための試験方法
- 3) 公表価格 HP <http://kohyo.kensetsu-plaza.com/>

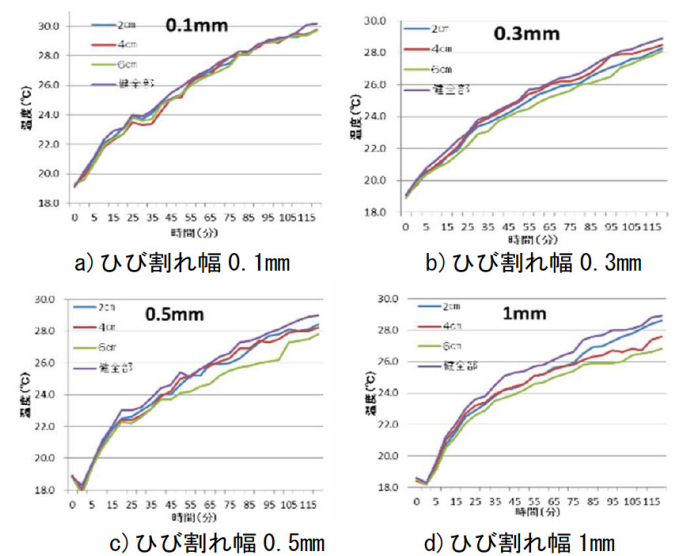


図 12 ひび割れ幅・深さ別模擬ひび割れ試験体温度変化

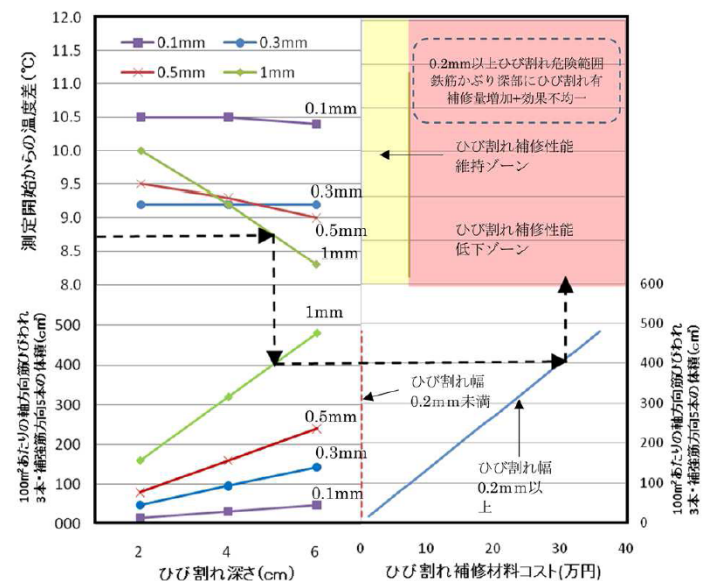


図 13 ひび割れ深さと幅の関連図

エリア防災拠点をつなぐ自立移動式災害対応支援ユニットの開発

地域防災拠点、災害支援、ゼロエネルギー、情報発信

中島 裕輔*

1. はじめに

災害時、エリアの現地本部や小中学校等の避難所、一時滞在施設等の地域防災拠点では、情報収集・発信、地元住民や帰宅困難者の受け入れ、救急救護などのため、エネルギーおよび情報通信インフラの確保は最重要課題である。ところがその整備はなかなか進んでいないのが現状である。そこで、テーマ 3 では、災害時にこれらの地域防災拠点に駆けつけることができ、情報通信面、必要最小限のエネルギー供給面、救急救護面のサポートを行う、自立移動式ゼロエネルギーユニット（D-ZEV: Disaster-robust Zero Energy Vehicle）の開発をおこなう。

このユニットは、①自然エネルギーを活用した発電・蓄電設備、太陽集熱設備、長距離無線 LAN・DTN／ICN 技術を活用した非常用通信設備、および、救急救護・災害医療活動を支援する空調換気システムを搭載した自動車（D-ZEV 本体）、および、②小回りが利き、エリア情報を収集する通信ユニットを掲載する二輪自動車の D-ZEV mini、で構成される。

D-ZEV 自身がエネルギー自立して行動できるとともに、防災拠点施設と通信連携可能な情報設備を備え、搭載するサイネージ等から情報発信を行う。避難所では仮設の無菌室や医療・救護スペースを開設し、その運用をサポートする。さらに、小回りの利

く電動二輪の D-ZEV mini と連携し、D-ZEV を拠点とした近距離圏をカバーしながらお互いに情報連携し、地域住民や周辺帰宅困難者のスマートフォン等への情報発信に対応する。

平常時には、エネルギー自立性向上のための研究を行いながら、地域の環境・防災情報を収集発信するとともに、地域の防災訓練サポートを始めとした環境・防災啓発活動等をおこなう。

また本開発ユニットは、研究テーマ 1 との連携による各年度の防災イベント・地域防災訓練等で使用し、アンケート・ヒアリング調査を実施し、その有効性を検証のうえ、最終年度の実証実験を経て、実施・適用例とともに公開する。

2. 今年度の役割分担と成果

テーマ 3 の各メンバーは、研究の役割分担ごとに、D-ZEV のハード・ソフト面の仕様検討を行った。図 1 に、災害時の D-ZEV 運用イメージと研究メンバーの役割分担を示す。

中島（建築学部教授）は環境防災情報活用担当として、平常時・非常時にサイネージで発信すべき情報コンテンツの検討と、効果的な発信手法の検討を行った。水野（情報学部教授）は情報通信設備担当として、D-ZEV と災害対策本部施設との通信、及び

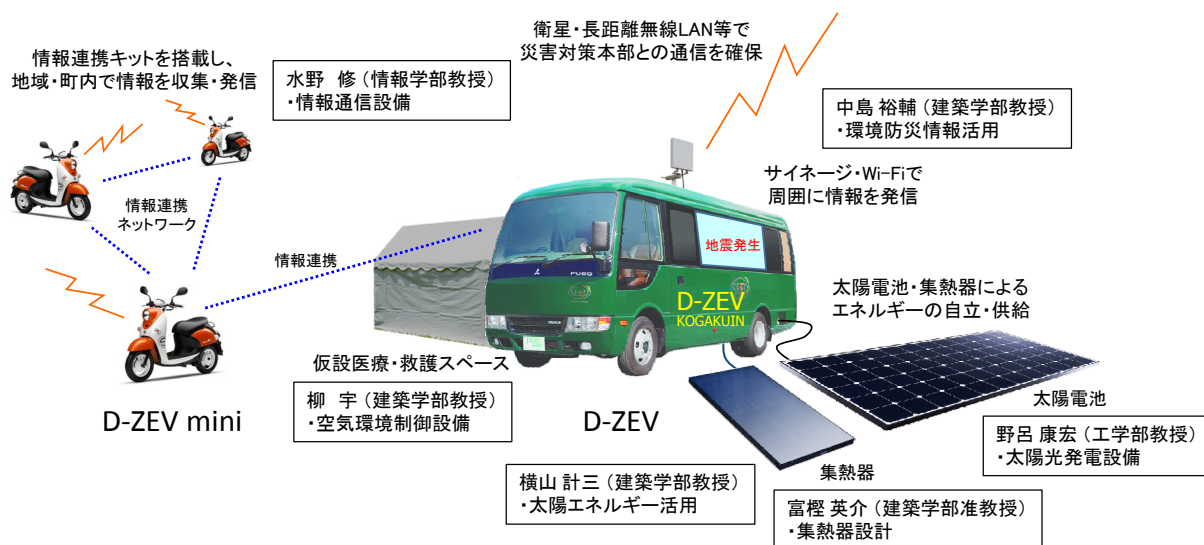


図 1 災害時の D-ZEV 運用イメージと研究メンバーの役割分担

*：工学院大学建築学部まちづくり学科

D-ZEV mini どうしの情報のやり取りの手法の仕様検討を行った。野呂（工学部教授）は太陽光発電設備担当として、D-ZEV の電力需要検討とそれに対応する太陽光発電・蓄電池設備の仕様検討を行った。富樫（建築学部准教授）は集熱器設計担当として、太陽集熱器の計算モデルの整備を行った。柳（建築学部教授）は、空気環境制御設備担当として、D-ZEV に接続する仮設の医療・救護スペースの構成と内部の空気環境制御方法に関する検討を行った。横山（建築学部教授）は太陽エネルギー活用担当として、集熱器計算モデルの整備とともに、太陽エネルギーの D-ZEV 及び医療・救護スペースへの供給手法とその仕様について検討を行った。

3. 今年度の環境防災情報活用面の成果

D-ZEV では、収集した情報の発信のため、デジタルサイネージの装備を想定している。既存のサイネージ調査や防災訓練時参加者へのニーズ調査の結果をふまえて検討した、デジタルサイネージの情報発信項目案を表 1 に示す。平常時にも避難場所や一時滞在施設などの防災情報を発信しながら、天気・環境情報や鉄道・交通情報などリアルタイムに更新される有用な情報を随時発信して日頃からこのサイネージの利用度を上げておき、非常時には災害対策本部とつないで周辺の被害状況や災害情報、避難指示などを発信することを検討する。これらの情報項目の大部分については、D-ZEV に附帯するサイネージに限らず、都市部に設置されるサイネージでは、同様の情報発信項目が求められると考えられる。

また、ある程度大画面のサイネージを装備しても、避難所等において同時に閲覧できる人数は限られ、混雑時には混乱を起こす危険性も考えられる。そこで、合わせて、情報取得の容易化と二次災害の防止

を目的として、デジタルサイネージ上の画面を近くにいる人々のスマートフォン画面にミラーリングさせるシステムキットの開発検討を行った。このシステムは、数秒間隔でキャプチャしたサイネージの画像を Wi-Fi ルーターで周囲に配信し、利用者は所定の Wi-Fi 電波にアクセスしてブラウザを起動するだけでサイネージ画面と同じ画像が見られる仕組みである。利用者にインターネット接続環境を提供するものではないため、多数の利用者へ円滑な情報配信が可能となる。また、一般的なデジタルサイネージであれば後からでも容易に設置できるよう、接続されている HDMI ケーブルの途中に組み込む方式としている。このシステムを D-ZEV 附帯のサイネージに組み込めば、災害時に停電等でインターネット接続ができない状況下においても、このサイネージの近くに行けば手持ちのスマートフォンで情報閲覧が可能となる。同時アクセス人数を想定してルータ能力を用意すれば数十メートルの距離まで届くため、避難所においても有効に活用できると考えられる。

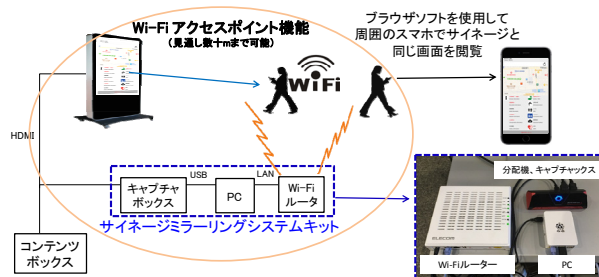


図 2 サイネージミラーリングシステムの構成

4. おわりに

これらの成果をもとに、次年度には実際に D-ZEV、D-ZEV mini 及びその附帯設備の製作を実施する計画であり、3 年目以降にはこれらを実運用できるように整備し、デモンストレーションや防災訓練時の運用実験等をおこなう予定である。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人セコム科学技術振興財団の研究助成「大災害時ターミナル周辺地区および地下街の安全安心対策としてのオフサイトセンターの実証研究」によって実施されたものである。

参考文献

- 1) 菅沼恒平、三橋徹、中島裕輔、エリア環境防災情報システム構築に向けたデジタルサイネージ活用に関する研究、日本建築学会関東支部研究報告集、2017 年 2 月

表 1 デジタルサイネージの情報発信項目案

平常時		非常時	
地図情報 周辺情報(商業・飲食・宿泊) 天気・環境情報 鉄道・交通情報 防災啓発情報 ニュース・行政情報 イベント・観光情報		地図情報 鉄道・交通情報 周辺被害状況 災害情報 避難勧告・指示 NHK情報	
地図上での表示内容			
交通系	観光・娯楽系	設備系	防災系
駅 バス停 タクシー乗り場	商業・飲食店 宿泊施設 周辺主要施設 観光スポット 公園 案内所	トイレ コインロッカー ATM ベビールーム 公衆電話 Wi-Fiスポット	避難場所 一時滞在施設 避難経路(非常時のみ) 物資配給場所(非常時のみ)

自立移動式ゼロエネルギー災害対応支援ユニット（D-ZEV）のための 通信システムの基本検討

キーワード：無線 LAN，アドホックネットワーク，DTN，情報指向ネットワーク

水野 修*

1. はじめに

本事業は巨大都市・中心市街地(新宿区等)とその周辺地域を対象として、震災・水害等による複合災害に強く、速やかな機能回復を可能とする「逃げる必要のない都市」の実現を目的としている。そのうち、テーマ 3 では、地域防災拠点であるエリアの現地本部や避難所等において、災害時に情報通信面、必要最小限のエネルギー供給面、救急救護面のサポートを行う、自立移動式ゼロエネルギーユニット(D-ZEV: Disaster-robust Zero Energy Vehicle)を開発する¹⁾。D-ZEV は、中型自動車をベースとして、防災・減災に必要な機材を搭載し、電源設備および通信設備を備えている。また、より小回りの利く 2 輪車ベースの D-ZEVmini も併せて実現する。

本報告では、D-ZEV および D-ZEVmini に搭載する通信システムの要件および実現案について示す。

2. D-ZEV の通信システムの要件

D-ZEV は、エリアの現地本部や避難所等に移動し、設営される。また、D-ZEVmini は、エリア情報を収集する。

これらに対して、図 1 に示すように通信経路は以下のものを実現する必要がある。

- (1)D-ZEV～災害対策本部間
- (2)D-ZEV～D-ZEVmini 間
- (3)D-ZEVmini～D-ZEVmini 間
- (4)D-ZEV,D-ZEVmini～一般市民、防災担当者

ここで、災害対策本部とは、街区の被害状況や鉄道の運行状況、病院、避難可能な施設等を把握し、一般市民や防災担当者に指示を行う施設であり、そのためのサーバスシステム²⁾を保有している。

前提として D-ZEV は車両ではあるが移動中には通信を行わないものとする。一方で、D-ZEVmini は移動中にも通信を行うこととする。また、いずれの場合でも、移動体網など通信インフラは使用できない、あ

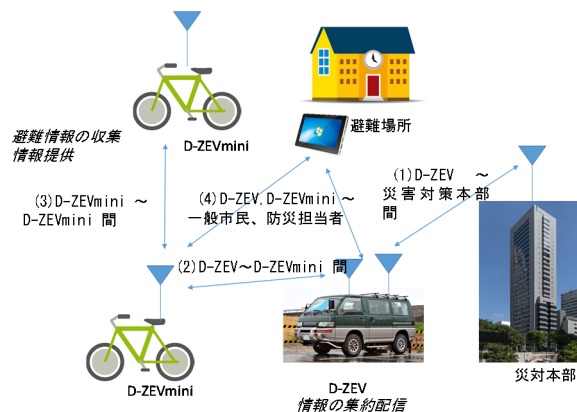


図 1 D-ZEV を中心とした通信ネットワーク

るいは使用制限があることを想定する。

D-ZEV および D-ZEVmini への通信システムの要件を以下に示す。

[要件 1] 小型であり、省電力であること。

[要件 2] 設営や運営が容易であること。

[要件 3] 安定した伝送条件でなくとも、持続的に運用できること。

[要件 1] は、D-ZEV や D-ZEVmini の搭載スペースや電源に制約があるためである。

[要件 2] は、D-ZEV で移動できる人員に制限があること、被災者救護など本来の作業に支障をきたさないにするためである。また、運用に際し無線従事者資格が不要であることも含まれる。

[要件 3] について説明する。2010 年度から 2014 年度まで実施された文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（以下、Research Center for Urban Disaster Mitigation : UDM）にて、減災情報ネットワークに長距離無線 LAN システムの適用を検討した³⁾。その結果、72 時間の連続運用は可能であり、見通しのある 2km 程度の距離（工学院大学新宿キャンパス屋上～早稲田大学西早稲田キャンパスシルマンホール屋上）であれば、15Mbps 程度のスループットが安定してとれることが明らかになった。しかし、新宿～八

* : 工学院大学情報学部情報通信工学科

王子の長距離区間（約 30km）や、近距離でも西新宿の街区内地上においては、見通しがとれる箇所が限定されるとともに、街路樹や車・人の通行によりスループットが安定しない現象も観測された。

D-ZEV および D-ZEVmini が活動する範囲は、街区内の路上であることを考えると、不安定な伝送状況を前提とした通信システムを構築する必要がある。

3. D-ZEV の通信システムの実現案

3.1 D-ZEV～災害対策本部間

災害対策本部が工学院大学新宿キャンパスに置かれ、D-ZEV の移動範囲が新宿界隈である場合は、D-ZEV～災害対策本部間は、UDM の設備を転換し長距離無線 LAN を用いることが可能であると考えられる。

5.6GHz 帯は免許不要であり、比較的安定して利用できると考えられる。D-ZEV は可搬型のアンテナを持ちて利用の際に組み立てて使用することとする。

今後の課題としては、基地局を無指向アンテナで対応できるか検証し、もし難しければ指向性アンテナをモータで位置決めするなどの対処を検討する。

なお、音声による通信手段は UHF 帯を用いる MCA 無線により実現できるものと考えられる。

3.2 D-ZEV～D-ZEVmini 間および D-ZEVmini ～D-ZEVmini 間

災害時の通信手段としてモバイルホックネットワーク（MANET:Mobile Adhoc NETwork）の利用が提案されている。これは、複数の端末をネットワークのノードとして結び、相手までの経路（リンク）を構築し情報を伝達する方式である。これは、経路が作られているので、リアルタイムでの情報伝送が可能であるが、リンクが不安定であると、切断してしまう。

ノードに情報を蓄えながら通信を行うのが Stored and Forward 型通信である。必要な情報が途中のノードにあれば、単点まで経路を持つ必要がない。この技術を応用した方式が情報指向型ネットワーク（ICN : Information Centric Network）である。ICN は主に大容量コンテンツの伝送に用いられるが、センサデータの収集への応用も検討されている⁴⁾。また、1 対 1 でリンクを形成しながら、情報を蓄積し伝達する、DTN(Delay Tolerant Network)も提案されている。DTN は情報伝送時だけ経路を形成するため、品質が不安定でも適用できるが、情報が目的とする相手まで伝わるかどうかは保証されない。

我々は、MANET と DTN を切り替えながら通信を行う MANET-DTN 統合ネットワークを提案している

⁵⁾⁶⁾。 ZigBee のモジュールである XBEE を用いて、MANET-DTN 統合ネットワークのノードを実装し、MANET→DTN→MANET の切り替えを確認した。図 2 に実験概要を示す。サーバは固定されているが、サーバから円で示す直接通信できる範囲では MANET で通信する。ノードが円から外に移動するとノード間は DTN で通信する。さらに別の MANET ノードと通信できる場合は、MANET として通信する。

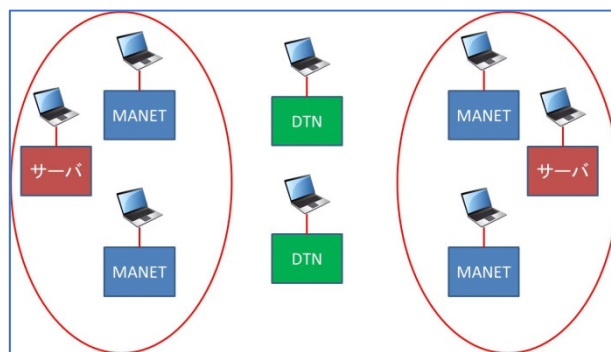


図 2 MANET-DTN 統合ネットワーク

MANET およびサーバからの電波強度により MANET, DTN を切り替えた通信が可能であることが確認できた。

今後は D-ZEV,D-ZEVmini への適用を検討する。

4. おわりに

D-ZEV,D-ZEVmini の通信システムと適用する基盤技術について検討した。今後は具体的なユースケースに沿って適用する方式を明らかにする。

謝辞

本研究の実験の一部は、JSPS 科研費基盤研究(C)26330116 の助成によって実施されました

参考文献

- 1) 工学院大学,平成 28 年度私立大学ブランディング事業 <http://www.kogakuin.ac.jp/bousai/>
- 2) 飯塚 航, 水野 修, “複合災害対策システムのためのユーザコンテキスト推定方式の実験的評価”, 信学技報, vol. 115, no. 368, NS2015-128, pp. 7-12, Mar., 2016.
- 3) 水野 修, 隆 晃人, 山本 翔, 澁澤 祥, 浅谷耕一, “災害対策拠点の分散化を支援する減災情報ネットワークシステム”, 工学院大学研究報告, Vol.120, pp.57-60, Apr., 2016.
- 4) 改田高大, 小池将史, 水野 修, “情報指向型ネットワークを適用したセンサネットワークにおけるデータキャッシュ方式” 電子情報通信学会論文誌 B, J100-B/2, 48-58, Feb. 2017.
- 5) 池間優司, 水野 修, “統合ネットワークを用いた情報収集システムにおける DTN モード通信制御方式”, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol. 114, pp13-18, Mar., 2015.
- 6) 松本卓也, 水野 修, “MANET-DTN 統合ネットワークの実装評価” 電子情報通信学会技術研究報告 vol. 116, no. 485, IN2016-138, pp. 245-250, Mar., 2017.

太陽熱集熱器モデルの整備

太陽熱集熱器、シミュレーションモデル、集熱特性

富樫 英介* 横山計二**

1. はじめに

本計画では「平時の快適性」と「被災時の活動可能性」の両者を担保した、自立・車両型建築（D-ZEV: Disaster-robust Zero Energy Vehicle-home）を開発する。自立性能を確保するための主要なエネルギー源は太陽エネルギーであり、太陽光発電および太陽熱集熱器が有力な候補である。D-ZEV の仕様を検討するためにはこれらを導入した場合の性能を精度よく予測する必要がある。そこで本年度は既往の研究を調査し、太陽熱集熱器の計算モデルの整備を行った。

2. モデルの開発

平板型集熱器の理論に関しては Beckman と Duffie による図書¹⁾および種村による解説²⁾が詳しく、本計画で開発するモデルもこれらを基礎とする。

1) 集熱器の構造

図 1 に平板型集熱器の一般的な断面構造を示す。日射熱を取得するために日射吸収率の高い素材の集熱板が敷かれ、集熱板の熱を熱媒体に移動させるために、適当なピッチで集熱媒体流管が設けられる。熱媒体は通常は水であるが、冬期の凍結を防ぐために不凍液を循環させる例もある。外部への熱損失を防ぐという目的のため、集熱板の裏側には断熱材が設置される。一方、表側は日射透過率の高い素材（透過ガラス）で覆うことで、日射熱取得を阻害せずに対流による熱損失を抑制する。

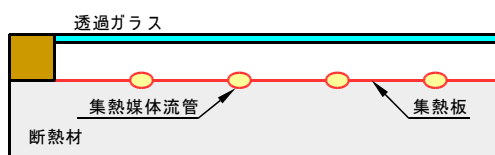


図 1 平板式集熱器の断面構造

2) 集熱量の基礎式

太陽熱集熱器のパネル面へ入射する熱は、その全てが熱媒体へ移動するのではなく、いくらかは外部へ漏洩する。パネル面が吸収する日射量を S_p [W/m²] とすると、熱媒体へ有効に伝達できる熱量 Q_u [W] は式(1)で表現できる。 T_p [°C] と T_a [°C] はパネルと外気の温度である。

$$Q_u = A_c (S_p - U_L (T_p - T_a)) \quad (1)$$

U_L [W/(m²·K)] は外界への熱損失係数であり、その具体的な導出方法が問題であるが、図 2 に示す熱回路網として捉えれば、式(2)で計算できる。

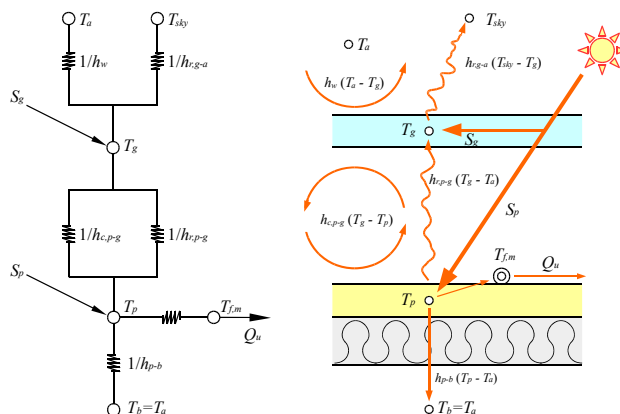


図 2 平板式集熱器の熱回路網表現

$$Q_u = A_c F_R \left(S_p + S_g \frac{U_{p-g}}{U_{p-g} + U_{g-a}} - U_L (T_{f,i} - T_a) \right) \quad (2)$$

集熱器熱除去因子 F_R は次の 2 つの温度分布の影響をモデルに表現するための係数である。1) 集熱板の熱伝導の制約により熱媒体の流れと直交する方向に生じる温度分布（熱媒体流管部分で温度は最低となり、管から離れるに連れて上昇する）。2) 熱取得による熱媒体が集熱器内で昇温し、流れと並行する方向に生じる温度分布（熱媒入口側で温度は最低となり、出口に向かうに連れて上昇する）。集熱器熱除去因子 F_R [-] はフィン効率を用いて式(3)で計算できる。

$$F_R = \frac{m_f c_p}{A_c U_L} \left[1 - e^{-(A_c U_L F' / m_f c_p)} \right] \quad (3)$$

F' [-] は円管と平板で構成される集熱器のフィン効率であり、式(4)で計算する。

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [d_o + (W - d_o) F]} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{\pi d_i h_{f,i}} \right]} \quad (4)$$

d_i [m], d_o [m], W [m] はそれぞれ集熱媒体流管の内径、外径、設置間隔であり、図 3 に示す通りである。 C_B は流管とパネルの間の接着剤部分の熱通過率であるが、流管とパネルが一体化した伝熱性の高い製品に関しては本項を無視（ $1/C_B = 0$ ）しても大きな誤差は生まれない。 $h_{f,i}$ は熱媒体流管の内部の対流熱伝達率である。 F [-] は四角フィンのフィン効率であり、式(5)、式(6)で計算する。ここで k と δ はそれぞれパネルの熱

* : 工学院大学 建築学部 建築学科

* : 工学院大学 建築学部 まちづくり学科

伝導率 $[W/(m \cdot K)]$ と厚み $[m]$ である。

$$F = \frac{\tanh[m(W - d_i)/2]}{m(W - d_i)/2} \quad (5)$$

$$m = \sqrt{U_L/k\delta} \quad (6)$$

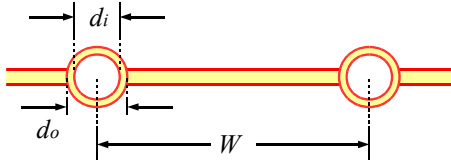


図3 集熱媒体流管と集熱板の構成

3) 係数の算出方法

基礎式内の各種の係数の具体的な算出方法を記す。

- ・ガラスの外側表面の対流熱伝達率 h_w

外界に面しているため、外部風速の影響により値が変わる。木村らによる実験式³⁾を式(7)に示す。 v は風速 $[m/s]$ である。

$$h_w = 4.7 + 7.6v \quad (7)$$

- ・ガラスの外側表面の放射熱伝達率 $h_{r,g-a}$

天空を完全黒体（放射定数=1.0）とし、放射温度を T_{sky} $[K]$ とすると式(8)で計算できる。ただし σ は黒体の放射定数で $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ である。また、 ε_g $[-]$ はガラス面の長波長放射率である。近年の製品は、パネルからの熱損失量を低減することを目的に金属表面処理により放射率を下げている、0.05~0.2 程度の数値をとる。

$$h_{r,g-a} = 4\sigma\varepsilon_g \left(\frac{T_{sky} + T_g}{2} \right)^3 \quad (8)$$

- ・パネルとガラスの内側表面の放射熱伝達率 $h_{r,p-g}$

式(9)で計算する。ただし、 σ_{pg} は有効放射定数であり、パネルとガラスは平行平板であるとして式(10)で計算する。また、 ε_p はパネルの長波長放射率 $[-]$ であるが、素材にブラックステンレスやブラッククロームなどの選択吸収面を用いることで0.1程度に抑えている製品がある。

$$h_{r,p-g} = 4\sigma_{pg} \left(\frac{T_p + T_g}{2} \right)^3 \quad (9)$$

$$\sigma_{pg} = \frac{\sigma}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_g - 1} \quad (10)$$

- ・パネルとガラスの内側表面の対流熱伝達率 $h_{c,p-g}$

式(11)で計算する。ただし、 λ_a $[W/(m \cdot K)]$ は空気熱伝導率、 L_p $[m]$ は空気層の厚みである。 Nu はヌセルト数であるが、CSDにより自然対流を抑制し $Nu=1.0$ として運用可能な製品がある。

$$h_{c,p-g} = (\lambda_a/L_p)Nu \quad (11)$$

- ・パネルから集熱器背面への熱通過率 h_{p-b}

断熱材の厚みを l $[m]$ 、熱伝導率を λ_i $[W/(m \cdot K)]$ として式(12)で計算する。

$$h_{p-b} = \lambda_i/l \quad (12)$$

- ・熱媒体流管の内部の対流熱伝達率 hf_i

管内流速と無次元数を用いて導出する。

- ・ガラス面日射吸収 S_g とパネル面日射吸収 S_p

ガラス面に入射した日射エネルギーは反射と透過を繰り返して一部は外界に逃げ、一部はガラスに吸収され、一部はパネル面に吸収される。無限回の反射と吸収を繰り返した結果、ガラス面に吸収される日射量とパネル面に吸収される日射量は式(13)~(16)で計算できる。ここで $\alpha_{T,g}$ と $\alpha_{T,p}$ は総合吸収率 $[-]$ 、 τ_g は日射透過率 $[-]$ 、 α_g と α_p は日射吸収率 $[-]$ 、 ρ_g と ρ_p は日射反射率 $[-]$ である。添字の g と p はそれぞれガラスとパネルを表している。

$$S_g = I_{DN} \cdot \alpha_{T,g} \quad (13)$$

$$S_p = I_{DN} \cdot \alpha_{T,p} \quad (14)$$

$$\alpha_{T,g} = \alpha_g + \tau_g \rho_p \alpha_g + \tau_g \rho_g \rho_p^2 \alpha_g + \dots = \alpha_g \left(1 + \frac{\tau_g \rho_p}{1 - \rho_g \rho_p} \right) \quad (15)$$

$$\alpha_{T,p} = \tau_g \alpha_p + \tau_g \rho_g \rho_p \alpha_p + \tau_g \rho_g^2 \rho_p^2 \alpha_p + \dots = \frac{\tau_g \alpha_p}{1 - \rho_g \rho_p} \quad (16)$$

4) 解法

以上の基礎式を統合し、集熱器の集熱量を計算するフローを図4に示す。パネルおよび硝子の温度を未知数として収束計算を行う。

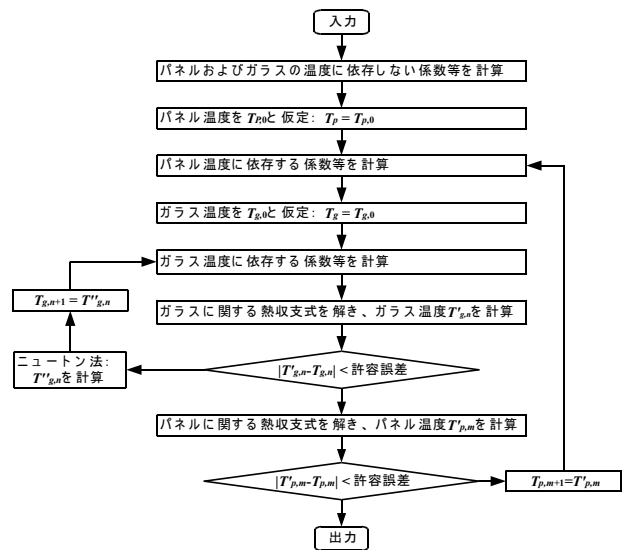


図4 集熱器の計算フロー

3. おわりに

太陽熱集熱器のモデルを整備した。次年度は本モデルも活用しつつ、導入する集熱器の仕様を固める。

参考文献

- 1) John A. Duffie, William A. Beckman : Solar Engineering of Thermal Processes, 1950
- 2) 種村栄 : 平板形太陽熱集熱器の高性能化の理論的背景と現状, 空気調和・衛生工学 57(1), 1983, pp.9-17
- 3) 伊藤直明, 佐藤鑑, 岡樹生 : 自然風下における建築物外壁面の対流熱伝達について(II), 日本建築学会大会学術講演梗概集. 計画系 43, 1968, pp.239-240

自立移動式ゼロエネルギーユニットにおける電源供給システムの研究

キーワード：太陽光発電、蓄電池、自立移動式、電力供給

野呂 康宏*

1. はじめに

避難所は地震などの災害時において情報発信や避難生活の拠点となる重要な施設である。本事業のテーマ 3 では、災害時に避難所等の地域防災拠点に対し、情報通信面、必要最小限のエネルギー供給面、医療・救護面のサポートを行う、自立移動式ゼロエネルギーユニット（D-ZEV：Disaster-robust Zero Energy Vehicle）を開発する計画である。本研究は、D-ZEV において自立的に電力を供給するシステムに関するものである。

2. 研究計画

2.1 研究の目的

本研究の目的は、D-ZEV の開発において、移動可能という制約条件下で自然エネルギーを有効活用し電力エネルギーを供給するシステムを開発し、防災イベント・地域防災訓練における有効性の検証を含めて、成果をまとめて公開することである。

2.2 対象の構成・運用

図 1 に、本研究の対象とする電源供給システムのイメージを示す。大災害時に防災拠点等へ移動して利用することを想定しており、商用系統は停電して利用できない前提で自立的に電力供給可能なシステムを構築する。過去の大震災時の状況では、停電から復旧に 1 週間程度要しているケースもあること、および交通事情等により燃料の供給も期待できないことより、燃料供給の不要な太陽光（PV）パネルによる発電を主なエネルギー源とする。当然ながら太陽光発電のみでは夜間や雨天時に発電できないため、蓄電池を利用し、発電余力がある時間帯に蓄電池に充電しておき、発電できない時間帯は蓄電池から D-ZEV 内の負荷へインバータ経由で電力供給するものとする。

また、これらの設備は、D-ZEV 内に積載可能なサイズ・重量とし、災害が発生したのちに避難所などの防災拠点に移動し、PV パネルなどを短時間で設置できるように考慮する。

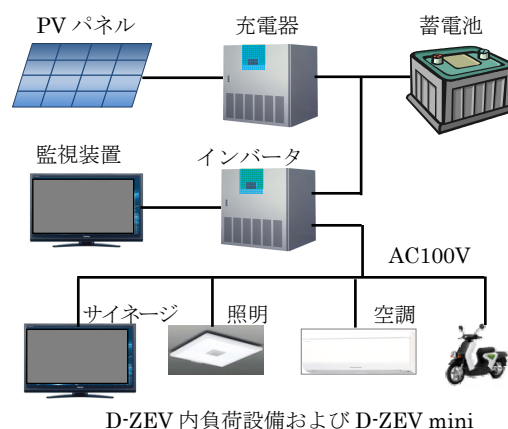


図 1 D-ZEV における電力供給システム

2.3 研究の実施計画

D-ZEV 本体、D-ZEV mini、仮設の医療・救護スペースに自立的に電力を供給するシステムに関して以下の検討を行う。

- 1) H28 年度 外部からのエネルギー供給に頼らず自立的に電力エネルギーを供給することが可能な太陽光発電システムと蓄電池システムに関して、D-ZEV に搭載して運搬可能であるという制約条件の下、仕様を検討する。
- 2) H29 年度 想定される負荷条件も考慮しながら、太陽光発電、蓄電池などのシステム仕様を決定する。さらに D-ZEV に組み込み試作し、PV 発電量や負荷の消費電力測定を行い、要求性能の検証を行う。並行して、システムの運用状況を監視し、PV の発電状況や蓄電池の残量など考慮して、利用可能な電力のガイドを表示するシステムの立案を行う。
- 3) H30 年度 試作した D-ZEV および D-ZEV mini を代表的運転モードで稼働させ、電力に関する運転データを収集分析し、目標レベルの検証を行う。また、監視システムのプロトタイプを製作し、上記稼働にあわせて評価を行う。
- 4) H31 年度 前年度までの検討で得られた成果・課題を反映して改良可能な部分は改良し、完成度を高める。地域防災訓練等にも参画し、現場での活用実験を行い、データ収集・分析を進める。

* 工学院大学 工学部電気システム工学科

5) H32 年度 D-ZEV を完成させ、公開する。その際、当初の電力供給設備の仕様で過不足があれば、その条件も明確にする。

2.4 期待される研究成果

1) 3 年時の中間成果 自立移動式ゼロエネルギーユニットに太陽光発電や蓄電池などのシステムを組み込み試作し、代表的運転モードで稼働させ、運転データを収集分析して性能検証を行う。監視システムのプロトタイプを製作し評価する。

2) 5 年時の最終成果 現地での実証実験も経て改良を行い D-ZEV を完成させ、公開する。

3. 今年度の成果

3.1 実施内容

報告者らはこれまで、災害時に自立的に電力エネルギーを供給可能なシステムとして下記三つの観点から検討を進めている。

- ① 家庭（オール電化住宅）を対象としたシステム¹⁾
- ② 避難所（小学校などを想定）²⁾
- ③ 市単位（23 区外の市部を想定）

これらは、いずれも大災害により商用系統が停電した場合を想定しており、PV を活用する点も含めて本研究とも共通するが、移動式でなく固定の設備である点が、異なっている。以下に結果の概要を示す。

①家庭向けでは、既にメーカーより家庭用蓄電システムも販売されているが、これらは、「こういうシステムの仕様なので使い方はその範囲でユーザが決めてください」という位置付けである。本研究では、消費電力の大きなオール電化住宅を対象とし、経済性は考慮しつつも生活の質を極力低下させずに連続して電力を供給可能なシステム構成と、消費電力の予測や PV の発電予測、蓄電池の充電残量を考慮しつつ消費電力の使用量を制限するアルゴリズムを提案している。

②避難所では、小中学校を対象に避難スペースとなる体育館や救護スペースとなる保健室、乳幼児やお年寄りの避難スペースとして一部の教室を利用することを想定し、消費電力の推定を行い、これに自立的に電力供給が可能なシステムを検討した。シミュレーション結果より必要な設備容量は PV で 86[kW]、蓄電池で 541[kWh]となった。設置可能な容量であるが設備コストがかなり高くなることより、負荷制限などを検討して設備容量を削減する対策について検討中である。

③市単位では、直下型地震の確率が高いとされる国立市を対象に、震災直後に市部全域に自立的に電力供給可能なシステムを検討した。しかし、必要とする PV パネルを設置するだけのスペースは十分確保できず、ガスなどの燃料系の発電装置も必要との結論となった。さらに、燃料を保管するための設備のスペース確保も困難と思われる。多くの都市部は同様の結論になると予想される。

一方、自立移動式ゼロエネルギーユニットに関しては、負荷設備を概算し、これに自立的に電力供給可能な設備の仕様を検討中である。負荷設備の詳細、搭載する車両の条件と相互に調整が必要であるため、仮であるが、以下に示すとおり二種類検討中である。

1) 移動型

車両が移動中は社内に格納し、避難所など現場で広場などに PV パネルを仮設して発電する。設置が容易で軽量、省スペースであることが要件である。

- ・ PV 発電容量：4～5 kW
- ・ 蓄電池容量：20 kWh 程度
- ・ インバータ出力：AC 100 V、3 kW 程度

2) 車両固定型

フレキシブルモジュール等を利用して車両の屋根に搭載し、D-ZEV 内の照明などに利用する。

- ・ PV 容量：200～600W
- ・ インバータ出力：AC 100 V、200～500 W

3.2 導入設備

本年度は以下の設備を購入した。この設備は次年度以降に太陽光発電の発電量の計測や負荷の消費電力の計測に活用する予定である。

- ・ 品名、型式：メモリハイコーダー式、MR8880
- ・ メーカー：日置電機
- ・ 費用：250 千円

4. おわりに

これまでの研究の知見を活用して D-ZEV に自立的に電力を供給するシステムの仕様の検討を進めた。来年度は詳細仕様を確定し、D-ZEV 本体とともに試作を行う計画である。

参考文献

- 1) 梅田拓磨、野呂康宏：災害時における独立型 PV の供給電力量分析（その 2）、電気学会 H28 電力・エネルギー部門大会、論文番号 P54、2016
- 2) 梅田拓磨、野呂康宏：大災害時の避難所における独立型電力供給システムの検討（その 1）、電気学会 H29 全国大会、講演番号 6-284、2017

文部科学省 私立大学研究ブランディング事業（平成 28 年度）
工学院大学総合研究所 都市減災研究センター（UDM）

業績報告書

テーマ 1 村上正浩・境野健太郎・藤賀雅人（建築学部）
福田一帆・小西克己（情報学部）

国際学会論文（査読付も含む）

1. Horinouchi, A., Konishi, K., An Emergency Detection Algorithm for A Security Camera using Optical Flow, Proc. of RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, 2017

学術雑誌、商業誌、研究機関への研究報告、展望、解説、論説など

1. 境野健太郎、アーキテクチャー×マネジメント 横浜市立みなと赤十字病院、『病院』、Vol.75/ No.12、pp.920-925、医学書院、2016.12

招待講演

1. 村上正浩、大学が地域社会に対してできること-地域防災拠点としての工学院大学の取組-、平成 28 年度私立大学庶務課長会 12 月分科会、2016.12
2. 村上正浩、新宿駅周辺地域の地震防災対策の取り組み、西梅田防災勉強会、2016.11
3. 村上正浩、新宿駅周辺地域の防災活動の動向と新宿駅周辺商店街に期待すること、「おもてなし」の防災まちづくり、2016.11

口頭発表

1. 喜多未咲子、古川恵子、増留麻紀子、横須賀洋平、境野健太郎、本間俊雄、南九州過疎地域のネットワーク解析による地域特性-地域の特徴と集落の共通点・相違点の把握-、第 56 回日本建築学会九州支部研究発表会、2017.3
2. 柳田悠太郎、村上正浩、新宿ルール実践のための行動指針の効果検証に関する研究、社会貢献学会第 7 回大会、2016.12
3. 村上正浩、住民主体の避難所開設・運営を支援する「避難所開設キット」の開発と導入効果の検証、社会貢献学会第 7 回大会、2016.12
4. 喜多未咲子、本間俊雄、古川恵子、増留麻紀子、横須賀洋平、境野健太郎、ネットワーク解析を用いた南九州過疎地域の内部構造分析、第 39 回情報・システム・利用・技術シンポジウム、日本建築学会、H42（4 頁）、2016.12

外部資金の獲得

1. 村上正浩、新宿区・受託研究、2016 年度、新宿駅周辺地域都市再生安全確保計画関連業務、研究代表者、9,504 千円
2. 村上正浩、新宿区・受託研究、2016 年度、新宿駅周辺防災まちづくり事業及び新宿駅周辺防災対策協議会西口地域訓練業務、研究代表者、4,000 千円
3. 村上正浩、新宿区・受託研究、2016 年度、避難所運営管理訓練等企画運営業務、研究代表者、3,000 千円
4. 藤賀雅人、一般財団法人民間都市開発推進機構都市再生研究助成、2016-2017 年度、2021 年以降を見据えた木造密集市街地のストック更新と共有空間の包括的評価手法の検討、研究代表者 2,200 千円
5. 村上正浩、科学技術振興機構・SIP、2014～2018 年度、巨大都市・大規模ターミナル駅周辺地域における複合災害への対応支援アプリケーションの開発、研究分担者、20,678 千円

各種メディア（新聞・テレビ・ラジオなど）・展示会等で公表

1. 村上正浩、大学倶楽部・工学院大 災害を想定し、ドローンによるエリア防災技術の開発スタート、毎日新聞、2017年2月23日
2. 村上正浩、災害時に「逃げる必要のない都市」の実現へ……工学院大学の取り組み、@nifty ニュース、2017年2月22日
3. 村上正浩、～ 日本初、超高層ビル街でドローンを活用した災害対応実証実験を実施 ～工学院大学が建築学と情報学を融合し、エリア防災活動支援技術の開発をスタート、sankeiBiz、2017年2月21日
4. 村上正浩、超高層ビル街でのドローンを活用した災害対応実証実験を実施、ドローンタイムズ、2017年2月13日
5. 村上正浩、日本初、高層ビル街でドローン災害訓練、Yahoo!ニュース Japan、2017年2月13日
6. 村上正浩、地震だ、ドローンの出番 新宿区・企業など実験、朝日新聞、朝刊33面、2017年2月12日
7. 村上正浩、災害時ドローン 新宿で実証実験、読売新聞、朝刊37面、2017年2月12日
8. 村上正浩、ドローンを災害時に活用…移動する利点、俯瞰する利点、レスポンス、2017年2月12日
9. 村上正浩、ドローンの安定飛行実験、搭載スピーカーで誘導も、ビューポイント、2017年2月12日
10. 村上正浩、超高層ビル街でドローン実験＝災害時、状況把握に活用－東京新宿、時事ドットコム、2017年2月11日
11. 村上正浩、損保ジャパン日本興亜など、ドローンを活用した超高層ビル街での災害対応実証実験を実施、日本経済新聞 web、2017年2月7日
12. 村上正浩、ドローンを活用した超高層ビル街での災害対応実証実験、日経テクノロジーオンライン、2017年2月7日
13. 村上正浩、高層ビル街の避難誘導にドローン活用実験、産経新聞、朝刊4面、2017年2月5日
14. 村上正浩、新宿のビル街でドローン実験 災害時の情報伝達や避難誘導に備え、日本経済新聞、朝刊31面、2017年2月3日
15. 村上正浩、ドローンを活用した超高層ビル街での災害対応実証実験、日本経済新聞 web、2017年2月3日

ほか、70件

その他（報告会・シンポジウムの主催・共催など）

1. 村上正浩、新宿駅周辺防災対策協議会シンポジウム「最新の動向や他地域の事例を知り 防災・まちづくりに取り組もう!!」、2017年2月
2. 藤賀雅人、一寺言問を防災の町にする会（一言会）、藤賀研究室ほか「カエルキャラバン in 寺島 2017」、2017年2月
3. 村上正浩、藤賀雅人、社会貢献学会第7回大会「Design & BOSAI -社会に貢献する人、まちのあり方-」、2016年12月
4. 村上正浩、平成28年度新宿駅周辺防災対策協議会地震防災訓練、2016年11月

テーマ2 山下哲郎・田村雅紀・久田嘉章・西川豊宏（建築学部）

査読付き論文

1. 加藤研一, 久田嘉章, 石田 寛, 渡辺哲史, 鈴木文乃, 小鹿紀英, 東京臨海部を対象とした想定地震に基づく設計用地震動評価例, 日本建築学会技術報告集, Vol. 23, No. 53, p. 53-58, 2017. 2
2. 米山嘉貴, 西川豊宏, スプリングラ巻き出し配管の動的加力実験建築の非構造部材・建築設備の耐震補強と改修に関する研究 その2, 日本建築学会技術報告集, pp. 189-193, 2017. 2
3. 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治, 材料物性と下地仕様の観点からみた木摺り漆喰天井部材における基本性能と健全度評価に関する実験的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第82巻, 第731号, 2017. 1
4. 久田嘉章, レジリエンスな社会構築のための被害低減策と対応力向上策の現状と事例報告, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol. 72, No. 2, p. I-1-1-14, 2016. 11

国際学会論文（査読付も含む）

1. Y. Hisada, K. Kasai, T. Yamashita, D. Du, W. Pu, K. Shirasaki, H. Aoki, M. Nakanishi, Damage Prediction And Retrofit Plan Using Dampers For A High-Rise Steel Building In Tokyo Based On Its Response Records, 16th World Conference on Earthquake Engineering, 2017. 1
2. Y. Masuzawa, T. Kanai, Y. Hisada, T. Yamashita and S. Koizumi, Study on Aseismic Performance of Integrated Ceiling System and Anti-fall Measures of Ceiling, 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago Chile, USB Memory, 2017. 1
3. Y. Hisada, J. Kaneda, A. Teramoto, M. Murakami, Y. Masuzawa et. al., Strong Ground Motions And Damage Investigation Of Buildings In The Vicinity Of The Surface Faulting Of The 2016 Kumamoto Earthquake In Japan, 16th World Conference on Earthquake Engineering, 2017. 1

学術雑誌、商業誌、研究機関への研究報告、展望、解説、論説など

1. 田村雅紀, Second International Conference on Concrete Sustainability (ICCS 16) in Madrid, Spain, コンクリート工学, Vol. 54, No. 11, pp1140-1141, 2016. 11
2. 田村雅紀 建材への道のり, 第2回 石材編, 建材試験情報 Vol. 52, pp30-33, 2016. 11

招待講演

1. 久田嘉章, 首都圏で想定される地震被害とレジリエントな対策, 防災・減災セミナー2017, 防災ログ, 2017. 3
2. 久田嘉章, 新宿駅周辺における地域連携による超高層建築の地震防災の取り組み, 第21回震災対策技術展, 2017. 2
3. 久田嘉章, 被害地震から学ぶ長周期・長時間地震動と震源近傍の地震動, 第92回耐震構造研究会, 2016. 12
4. 久田嘉章, 首都圏で想定される地震被害とレジリエントな対策シンポジウム, 「Design & BOSAI - 社会に貢献する人、まちのあり方-」, 社会貢献学会第7回大会, 2016. 12
5. 久田嘉章, 断層近傍の強震動計算実習, 「強震動予測-その基礎と応用」第16回講習会, 日本地震学会, 2016. 12
6. 久田嘉章, レジリエンスな社会構築のための被害低減策と対応力向上策の現状と事例報告, 土木学会安全問題討論会' 16, 2016. 11
7. 久田嘉章, 病院からの全患者避難: 経験から学ぶ「新宿駅周辺地域における大震災時の多数傷病者に関する地域連携による対応力向上の取り組み」, 災害医療フォーラム in Tokyo, 2016. 11

口頭発表

1. 土田健太, 田村雅紀, 未利用地産資源を改良活用した無機系構造・仕上材料の開発, 2016年度日本建築学会関東支部研究報告集1, pp. 217-220, 2017. 3

2. 梅本真穂, 田村雅紀, 地域特性から見た景観構成要素となる地産壁土の色彩分布, 2016 年度日本建築学会関東支部研究報告集 1, pp. 73-76, 2017. 3
3. 梅原優, 田村雅紀, 窯業系サイディングの資源循環を可能にする再生材の研究, 2016 年度日本建築学会関東支部研究報告集 1, pp. 225-228, 2017. 3
4. 小野航太郎, 田村雅紀, 築 27 年経過した超高層ビルから採取したシーリング材の外部環境影響を踏まえた劣化度調査, 2016 年度日本建築学会関東支部研究報告集 1, pp. 261-264, 2017. 3
5. 村松凌, 田村雅紀, 天然鉱物含有型仕上塗材の熱的作用による劣化影響と苔植物の定着関係, 2016 年度日本建築学会関東支部研究報告集 1, pp. 229-232, 2017. 3
6. 中島駿介, 田村雅紀, 後藤治, 5 年間の屋外暴露による外部影響を受けた柿葺き屋根の劣化指標提案, 2016 年度日本建築学会関東支部研究報告集 1, pp. 65-68, 2017. 3
7. 原田香葉, 田村雅紀, ガラスと仕上材を合わせた意匠化粧材の開発と視覚的印象評価, 2016 年度日本建築学会関東支部研究報告集 1, pp. 245-248, 2017. 3
8. 佐藤勇太, 田村雅紀, 既存コンクリート構造体の赤外線サーモグラフィ装置を用いたひび割れ深さ検出, 2016 年度日本建築学会関東支部研究報告集 1, pp. 5-8, 2017. 3
9. 岡健太郎, 田村雅紀, 後藤治, 建築物の LCM における維持保全と保存的活用ストラテジー その 4 既存木摺漆喰天井の補修工法による岩手銀行旧本店本館への試験施工, 2016 年度日本建築学会関東支部研究報告集 1, pp. 53-56, 2017. 3

外部資金の獲得

1. 久田嘉章、文部科学省・科研費・基盤 B 一般／平成 21～23 年度／1,260 千円、設計用入力地震動作成のための強震動予測手法の適用と検証(研究代表者)
2. 久田嘉章、科学技術振興機構・SIP、2014～2018 年度、巨大都市・大規模ターミナル駅周辺地域における複合災害への対応支援アプリケーションの開発、研究代表者、20,678 千円

各種メディア（新聞・テレビ・ラジオなど）・展示会等で公表

1. 久田嘉章, 防止の専門家が住む家に学ぶ, AERA, 2017. 3
2. 久田嘉章, 糸魚川火災の初期消火について, NHK シブ 5 時, 2016. 12
3. 久田嘉章, 糸魚川火災の初期消火について, NHK シブ 5 時, 2016. 12
4. 久田嘉章, 楽しいデザインで防災活動に取り組む, 建設通信新聞, 2016. 12

その他（報告会・シンポジウムの主催・共催など）

**テーマ3 中島裕輔・富樫英介・横山計二（建築学部）
水野 修（情報学部）、野呂康宏（工学部）**

査読付き論文

1. 改田高大, 小池将史, 水野 修, “情報指向型ネットワークを適用したセンサネットワークにおけるデータキャッシュ方式” 電子情報通信学会論文誌 B, J100-B/ 2, 48-58, 2017. 2

口頭発表

1. 直井伸也、荒井純一、野呂康宏、インバータ電源で電力供給する自立マイクログリッドにおけるインバータ電源の制御方式、電気学会論文誌 B, Vol. 137, No. 6, 2017 (掲載決定)
2. 松本卓也, 水野 修, “MANET-DTN 統合ネットワークの実装評価” 電子情報通信学会技術研究報告 vol. 116, no. 485, IN2016-138, pp. 245-250, 2017. 3
3. 櫛田雅之, 櫻井宏章, 水野 修, “複合災害対策システムのためのスケーラブルなサーバ運用”, 2017 電子情報通信学会総合大会, A-19-11, 2017. 3
4. 櫻井宏章, 櫛田雅之, 水野 修, “複合災害対策システムにおける情報提示方式”, 2017 電子情報通信学会総合大会, A-19-12, 2017. 3
5. 望月寛大, 小池将史, 水野 修, “情報指向型ネットワーク方式を適用したセンサネットワークにおける情報取得手法”, 2017 電子情報通信学会総合大会, B-7-71, 2017. 3
6. 梅田拓磨, 野呂康宏、大災害時の避難所における独立型電力供給システムの検討（その1）、H29 電気学会全国大会、6-284、2017. 3
7. 岡安翔, 野呂康宏、再生可能エネルギーと蓄電池をベースとする電力システムの検討：需給制御方式（その1）、H29 電気学会全国大会、6-126、2017 年 3 月
8. 新井武尊, 野呂康宏、再生可能エネルギーと蓄電池による供給可能性の検討、H29 電気学会全国大会、7-068、2017. 3
9. 荻田知明, 野呂康宏、需給制御を可能とするインバータ制御方式の検討、H29 電気学会全国大会、4-114、2017. 3
10. 菅沼恒平、三橋徹、中島裕輔、エリア環境防災情報システム構築に向けたデジタルサイネージ活用に関する研究、日本建築学会関東支部研究報告集、2017. 2
11. 加藤明日佳、宮崎豪、三橋徹、中島裕輔、複合型学校施設のエネルギー消費実態調査と省エネ性・防災性向上に関する研究、日本建築学会関東支部研究報告集、2017. 2

外部資金の獲得

1. 中島裕輔、芝浦工業大学受託研究／平成 28 年度／1,600 千円、帰宅困難者への情報伝達システムに係わる基礎技術の開発（研究代表者）
2. 水野 修、新津善弘、文部科学省・科研費・基盤 C 一般／平成 26～28 年度／3,330 千円、社会的弱者に適用可能な減災情報提供方式(研究代表者)
3. 野呂康宏、指定研究費、2 件合計 300 千円

その他（報告会・シンポジウムの主催・共催など）

1. 野呂康宏、電力システム技術東京私学連合ブランチ発表会（電気学会後援の卒論生発表会共催）、2016 年 12 月