

文化遺産防災技術研究プロジェクト

代表：理工学部・教授 吉富 信太

研究メンバー：大窪 健之、金 度源、深川 良一、里深 好文、小林 泰三、藤本 将光、伊藤 真一、
持田 泰秀、福山 智子、吉富 信太

1. 防火環境整備技術の開発

研究担当者：大窪健之、金 度源

【研究目的】

(1) 地域防災情報ネットワークの開発

個別に設置されている住宅用火災警報器が感知した火災発生情報を、インターネットを介して自動的に地図付きメール配信により地域全体で共有し、地域住民による初期消火や避難活動に迅速に対応できるよう、情報共有システムの開発と実践配備を目指す。現在、企業との共同研究により特許の取得と実用化を果たし、青森県黒石重伝建地区などで社会実装が進んでいる。本研究課題では、社会実験などを通して地域固有の適応性能について検証しながら、現行の火災や健康障害以外の発災情報も共有できるよう、さらには延焼火災の動態をリアルタイムで共有できるよう、高機能化に向けたニーズの把握および技術開発を行う。

(2) 高機能型市民消火栓および多機能型消火器ボックスの開発

消防隊が即座に対応できないような大規模災害時には、消火活動の遅れは日本の歴史文化都市にとって致命的な被害となる。しかし現状の公設消火栓はプロの消防士が複数名で操作する必要があるなど、市民一人の力では取り扱いが不可能である。このため、災害時に地域に残された市民の力だけでも最低限の消火活動が可能にするために、特別な訓練を要することなく日常的に散水などにも利用することのできる、市民一人で操作が可能な高機能型市民消火栓や、景観に配慮しつつ誰もが使いやすい街頭消火器の配備技術を開発する必要がある。現在、企業との共同研究により、清水周辺地域での市民消火栓の配備が進んでおり、松山城や高知城でも社会実装が完了している。消火器ボックスについても加悦地区等においてデザイン設計を行い、順次設置が進められている。本研究課題では、さらにワンタッチでホース延長が可能で、歴史的景観に調和し、平常時にも使いやすい機能を備えた市民消火栓と、街頭設置できる多機能型消火器ボックスの開発を目指す。

(3) 木造壁面に散水して延焼火災を抑止する Water Shield System (WSS) の開発

木造文化都市においては、延焼抑止に必要な空地や防火壁の新規設置が困難である。このため、道路沿線に建ち並ぶ木造外壁面に最小限の散水を行うことで、木造壁面を一時的に防火壁として機能させることが重要となる。企業との共同研究によって特許の取得と技術開発を行い、妙心寺での社会実装が実現したが、本研究課題では、これを広く社会実装するためのさらなる研究開発を目指す。

【研究成果の詳細】

(1) 地域防災情報ネットワークの開発

これまで実装完了している「火災と急病」以外の新たな災害情報の配信可能性をはじめ、火

元の正確な場所把握、自宅の場所を明示したハザードマップ配信、避難完了信号の発信などに対して期待が寄せられている。これまで、青森県黒岩重伝建地区で実証運用しながらデータ収集を継続している。さらに京都市・先斗町地域の伝統的木造密集地域にご協力いただき、車両の入れない街路とともに、狭小ながら避難経路となり得る伝統的な路地空間を有する地域特性を踏まえ、地域にとって最適な形で火災発見、初期消火、観光客避難誘導をサポートすべく、システムを活用した火災対応訓練を実施しており、改善に向けた課題の抽出と避難シミュレーションモデルの構築によるシステム導入の効果について検証を行ってきた。2022年度には、コロナ禍において三密を避ける必要から通常の防災訓練を実施することが出来なくなったことを受けて、2020～2021年度に実施した、豊岡市・出石重伝建地区での「オンライン防災訓練」（グーグルフォームと記入用地図を利用したシナリオ・ゲーム形式の訓練プログラムを配信）に引き続き、京都市深草地域の住民と協力して、LINEアプリを活用したオンラインでのリスクマップの共同作製を試行した。

2023～2024年度にはシステムの社会実装先として、従来の青森県黒石重伝建地区に加えて、京都府加悦重伝建地区と兵庫県出石重伝建地区での地区防災計画に沿った導入に向けて、検討を継続している。

研究成果の一部はこれまでの特許申請につながっており、研究面でも今後学会への論文投稿を経て、広く社会に貢献していく予定である。

(2) 高機能型市民消火栓および多機能型消火器ボックスの開発

清水周辺地域で整備が完了した43基の市民用消火栓をはじめ、市民用の初期消火設備の性能強化に資する研究を目指している。

市民消火栓では、ホースの重さと容積の問題から1本当たりの長さが30m程度に制限されるため、これまでは消火可能範囲が限定されてしまう問題があった。このため付近の使われていない市民消火栓からホースのみを持参すれば、ノズルを取り外すことなくそのままワンタッチで延長が可能な機構を開発し、さらにノズルヘッドのコンパクト化・操作のシンプル化を図ってきた。2017年度には津和野重伝建地区にて、公設消火栓を市民用ホースで運用できる減圧アダプターを開発し、防災訓練の中で評価を行った。2018～2020年度はこれまでの成果を踏まえ、より使いやすい設備機器の改善と、日常利用推進のための環境整備のあり方について検討をおこなった。過去には市民消火栓の消火可能範囲を必要に応じて延長できるよう機能向上に取り組んできたが、2018年度までには取り扱いの難しい公設消火栓を使って市民消火を可能とする、減圧バルブ付きスタンドパイプを試作し、津和野重伝建地区で訓練に取り組んで有効性評価を行うとともに、研究成果を学会誌に寄稿することができた。2019年度以降は設備の改良を継続し試作の準備を行なった。2021年度には市民消火栓の外観デザインの改善提案と操作性の改良評価、日常利用活性化に向けた課題把握を目的に新型ノズルを使用した性能評価試験と、外観デザインに関する評価試験、清水周辺地域のユーザーへの聞き取り調査を実施しており、2022年度には共同開発先と共同して、ホース延長が不足した際にもワンタッチでホース延長が可能で消防設備の規格に適合した小型延長ノズルの試作を行った。2023年度には、愛媛県松山城跡での運用状況を調査するとともに、積極的な日常利用の実現に向けてワークショップによる課題把握を行った。2024年1月2日には清水地域の二年坂エリアで火災が発生し、実際に市民消火栓を使用した住民消火活動が実施されて事なきを得たため、その利用

者に対する聞き取り調査を行うなど、継続的なフォローアップを実施している。

以上に加えて、元々市民利用の困難な公設消火栓に対して、取り付けるだけで市民用消火栓ホースの接続が可能になる「減圧バルブ付スタンドパイプ」を試作し、訓練等を経て改良を重ねてきた。2018年度に津和野重伝建地区で実施した訓練の結果を踏まえて、学会誌への寄稿により成果報告を行った。2021年度には出石重伝建地区における導入効果について、GISを活用したシミュレーションを実施しており、2022～2023年度以降には試作制作を進めている。2024年度には清水寺での活用可能性について所有者と情報交換を行った。今後はさらなる特許取得や論文発表、社会実装に活かす予定である。

「多機能型消火器ボックス」の開発については、これまで加悦重伝建地区の住民との協議を経て試作品の改良を行ってきたが、2019年度には最終的なデザイン案に対し合意形成に至ることが出来た。2020年度は予算申請と現地での制作を完了しており、2022年度にはそのうち20基の設置場所について、優先順位を検討するための手法を確立し、住民とのワークショップを実施して現場での設置作業を行った。2023年度には、以上の実績を活かして、兵庫県出石重伝建地区における街頭消火器の配置計画を策定し、社会実装に向けた提案を行うとともに、加悦地区では住民説明会で周知を行った結果、実際に20基の地区内への設置が完了した。

2024年度にはこれを活用したレクチャーと防災訓練を実施している。この成果は卒業論文や投稿論文に反映され、今後も継続して社会実装を支援していく予定である。

(3) 木造壁面に散水して延焼火災を抑止する Water Shield System (WSS) の開発

これまで企業との共同研究によって特許の取得と技術開発を行い、妙心寺での文化庁補助事業による社会実装が実現している。妙心寺境内をフィールドとして、延焼火災による被害の低減を目的として開発・実装してきたウォーターシールドシステムのノズル設計を理論化するため、2016年度以降はノズルからの散水分布を最適化するための理論式の構築と、必要な実測実験を実施してきた。2017年度はウォーターシールドシステムとして開発してきたノズルを妙心寺に対して文化庁の認証を経て実践配備を完了することができたため、2018～2019年度にはノズルの設計理論について整理し理論式の改善と論文投稿への準備を行った。2020年度は首里城火災を受けた妙心寺への調査団の視察対応および、設備の現状点検を行い、首里城からの視察団に対応し、設備の普及に努め、2021年度～2023年度には維持管理のサポートと、あらたな配備に向けた検討を継続した。

2024年度には、木造文化都市京都市内を対象に、延焼火災発生時のシミュレーション結果に基づいて、消防隊による延焼抑止活動を補完するべく、具体的な配備計画手法について検討を行っている。この成果は卒業論文や投稿論文に反映される予定である。本研究課題では、さらに広く社会実装するための必要な研究開発を目指す。

〈主な研究成果〉

- ・竹内理登（立命館大学大学院）、大窪健之、金度源、隣接する町家の類焼可能性に関する研究－木造密集市街地における京町家の隣棟間隔に着目して－、第18回住宅系研究報告会、日本建築学会 農村計画委員会・都市計画委員会・建築計画委員会・建築社会システム委員会、pp.219-228、建築会館、2023年12月16日
- ・（アブストラクト審査で基調講演に選出）Takeyuki Okubo, Wataru Iwai, Dowon Kim and Michiko Hayashi, “Research on Functional Expansion and Study on Information Delivery

Policy for Developing the “Local Disaster Information System” in Kaya Preservation District”, Smart Informatics and Multi-Hazard Reduction (SIMR) 2024, オンライン出版, Loughborough University UK, 15-19 Sep 2024

【今後の研究計画・展開】

(1) 地域防災情報ネットワークの開発

今後は、火災発生情報や急病発生情報だけでなく、洪水や土砂災害、津波などの危険情報についても即時的な配信を可能とする多様な防災情報の受配信機能の実装と、スマートフォンによる地図情報の配信や電話による音声通知以外にも、既存の防災放送やサイレンなどと連動した多角的な情報配信により、市民への確実な情報伝達機能の実装を目指す。さらに、地震などによる建物倒壊箇所についても地図上に表示可能とすることで、最適な避難経路や消防侵入経路についての判断材料を提供することを目指す。延焼火災をリアルタイムで把握できるようなアルゴリズムを開発中であり、できればグーグルマップ等のオンラインマップアプリと連動させることで、ユーザーの現在位置と最適な経路検索も可能としたい。

(2) 高機能型市民消火栓および多機能型消火器ボックスの開発

今後は、隣接する収納箱から取り出した余剰のホースを使って、ワンタッチで筒先に延長可能なノズルシステムの開発および消防認定の取得と、直観的に操作できる回転ドラム型収納箱の試作機を使った実証実験による性能評価と並行して、停電時照明機構やサイン表示などのデザイン面での改善と、普段から日常利用を広めるためのルール作り等を加えて、現場での社会実験を継続しつつ改良を加えていく予定である。

消火器ボックスについても、現場での住民評価を踏まえながら地域特性に応じた景観と機能を両立させたデザインを導くことが出来た。次年度以降には、実際に地域に実装された現状を市民の視点から評価し、最適な配置や数、運用や管理方法について検証し、研究開発を継続していく予定である。今後は地域への実践配備に対する住民による評価研究を進める予定である。デザイン案そのものも、意匠登録やグッドデザイン賞への応募を予定している。

(3) 木造壁面に散水して延焼火災を抑止する Water Shield System (WSS) の開発

本研究課題では、これまで企業との共同研究によって妙心寺での文化庁補助事業による社会実装が実現しているところであるが、今後は当初の目標である伝統的な木造密集市街地の延焼リスク低減に資するため、さらに広く社会実装するための必要な研究開発を目指す。

2. 伝統木造建築物の耐震設計・耐震補強設計法の開発

研究担当者：吉富信太

【研究目的】

歴史都市の伝統的な街並みを構成する伝統的構法による住宅や社寺建築については、歴史的・文化的な価値を残した単なる保存だけではなく、利活用を促進するために利用者の安全性の確保が重要な課題である。そのためには、伝統工法建物の特性に応じた性能の把握と、補強方法法の構築が必要となる。本研究では、新しい補強方法として、高減衰のゴム要素を挿入した制振補強法の検討を行う。また、伝統工法木造建物において主要な耐力要素で得る土壁の性能向上のために、小舞仕様を変えた影響について検討する。

【研究成果の詳細】

(1) 土壁性能の小舞仕様の改良による性能向上に関する検討

伝統工法木造建物で主要な耐力要素として用いられる土壁について、内部に含まれる小舞が壁の性能に及ぼす影響について検討した。具体的には、通常は竹で編まれる小舞を、木格子を用いた仕様に変更した試験体を作成して静的水平加力試験を行い、小舞仕様の違いが荷重変形関係に及ぼす影響について検討した。これは、土壁の問題点として、大変形時に小舞が面外に座屈して土壁の剥落を引き起こすことがあり、面外の剛性を向上させることと、壁土の高速効果を向上させることで、土壁の剥落を防ぐことを意図している。

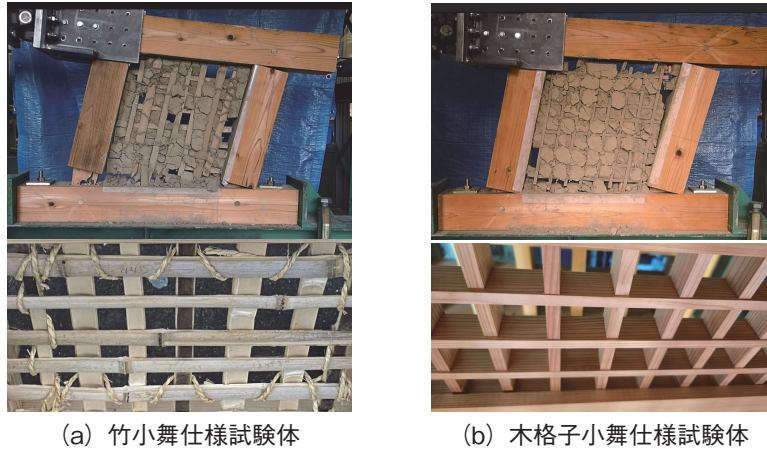


図1 土壁における小舞仕様の違いの影響

せん断方向の試験体と、隅角部の圧縮部を想定した試験体を作成した静的加力試験を行い、木格子小舞とすることで、耐力や靱性の向上の可能性が確認できた。より、安定した性能を発揮するための土壁工法の仕様作りが重要だと考えられる。

(2) 伝統木造建物を想定した制振補強方法

伝統木造建物の大変形に追従できる耐震補強要素として、制振装置として用いられる高減衰ゴムを用いた方法について検討する。本研究では特に、社寺建築など大断面の柱を有する建物の床下や天井裏に設置可能な制振補強法について検討する。上下2段の横架材を2本の柱間にかけ渡し、横架材間の相対変位に効くように板状の高減衰ゴムをせん断方向に作用させる。

1スパン分の柱梁架構を取り出し、制振装置の要素実験を行い耐力や変形性能、吸収エネルギーなどの特性について検討した。またこの補強方法は実際の建物に適用されたものであり、実建物を想定した解析モデルを構築し、耐震補強効果について検討した。

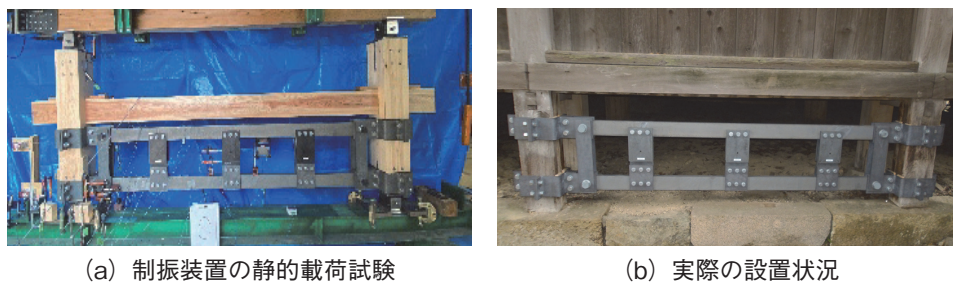


図2 床下制振補強

【今後の研究計画・展開】

伝統工法木造建物の特徴である大変形まで倒壊しない粘り強さを損なわないように、高い変形性能を有する補強工法の確立が望まれる。特に近年巨大地震が頻発しており、何度も大きな地震を経験しても性能が低下しない補強方法として、制振補強は一つの有効な選択肢といえる。こうした技術的な課題の解決だけでなく、認可制度や補助金制度などの支援の仕組みを整備することにより、伝統構法の後継者育成につながることを期待している。

3. 伝統木造建築物の構造特性の解明

研究担当者：吉富信太

【研究目的】

伝統的木造建築物の構造特性を、現地調査による建物被害の把握、実建物の多点同時振動計測、3次元立体解析モデルによる応答解析法により明らかにすることを目的とする。建物の実態に応じた解析モデルの構築を通じて、耐震性能評価や、補強方法の検討に役立てることを意図している。

【研究成果の詳細】

(1) 京町家の隣接棟の衝突による応答への影響

京都市街の連棟の京町家を対象として、起震機による加振実験を実施し、連棟の影響について検討した。建物の各層各通りに高感度の微動計を設置し、起震機を用い加振をし、1棟の揺れが隣接建物に影響することを明らかにした。実建物は微振動レベルでの検討であり、大変形時の検討を行うため、小型模型を用いた振動台実験を行った。京町家のように比較的特性の似た建物が隣接する場合、接触により一体化して振動する可能性が確認できた。こうした結果を考慮した立体解析モデルを構築して、地震時の衝突の影響についても検討を進めている。



(a) 連棟町家の多チャンネル同時計測



(b) 計測の様子

図1 連棟建物の同時振動計測

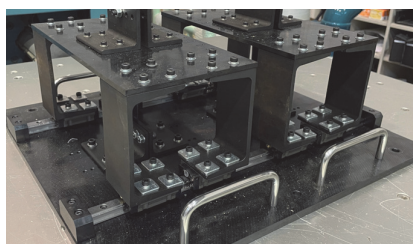


図2 小型模型を用いた振動台実験

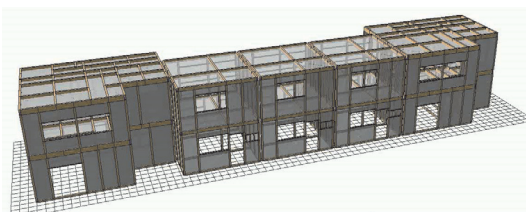


図3 衝突を考慮した応答解析

(2) 能登半島地震による建物被害調査

令和6年1月1日に発生した能登半島地震による建物被害調査を進めている。特に、関西の有志の構造研究者で、伝建築の保存につながる取り組みとして、重要伝統的建物群保存地区である輪島黒島地区の文化財建物を中心に、伝統的構法建物に着目した建物被害調査や応急補強の検討を実施している。調査では、柱の傾斜や床の不陸、被害状況の把握などを行っている。2007年の地震時の補強が十分でないために被害が大きくなった事例や、逆に補強部での被害が見られる個所もあり、補強方法の検討の重要性が確認できる。住民との交流を通じて、復興への機運向上につながることも期待している。引き続き、地元自治体、行政、文化庁、NPOと連携し、調査を実施し結果を住民に説明し、保存に向けた構造調査に協力予定である。

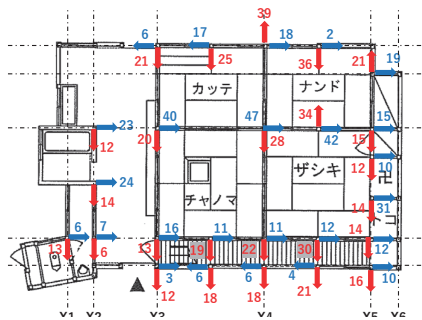


(a) 建物地震被害状況分布の調査



(b) 建物被害調査の様子

図4 建物地震被害調査



(a) 柱傾斜の計測例



(b) 耐震補強個所の損傷

図5 建物損傷の詳細調査

【今後の研究計画・展開】

今後、実建物の被害調査や振動計測による接触の効果の定量的評価と、振動台を用いた縮小模型の振動実験や複数建物の接触を考慮したシミュレーションを通じて、より実際の建物の性能評価につながる成果構築を目指す。

4. 歴史的建築物の継手加工技術・高倉の構造把握の取組み

担当者：持田泰秀

【研究目的】

(1) 歴史的建築物の継手加工技術

継手形状の違いによる力学性能を明らかにするだけでなく、制作者の技能習熟度の違いが引張強度に影響するかを検証する。研究の目的は、木材の手加工技術の習熟度による構造性能の違いを明確に技能習熟度の違いが継手引張強度に影響するかを検証する。

(2) 高倉の構造把握の取組み

全国には高倉という形式の建物があり、八丈島ではその風土と鼠害から収穫物を守るため高倉が一般的に建てられた。現在確認されたもので26棟と高倉の恩恵を多く受けていた地域であることがわかる。また、八丈島の高倉において他には見られない特異な構造形式であることが明らかになっている。平成19年から21年にかけて六脚倉の保存修理工事が行われ、軸部及び基礎における破損箇所が確認された。本研究は保存修理工事された六脚倉を対象として、文献的調査・建物調査を行い、八丈島における高倉の構造性能を明らかにして総合的な評価を与えることを目的とする。

【研究成果の詳細】

(1) 歴史的建築物の継手加工技術

木材加工の技能習熟度が異なる場合に、制作した継手の力学的性能が異なるかを実験的手法により検証を行うため、手加工による腰掛け蟻継ぎと腰掛け鎌継ぎについて、引張強度試験による力学性能の評価を行った。実験に使用した立山杉での継手引張強度については、継手形状による強度比が全加工者の平均強度として、鎌継ぎが蟻継ぎの3～5倍程度となった。

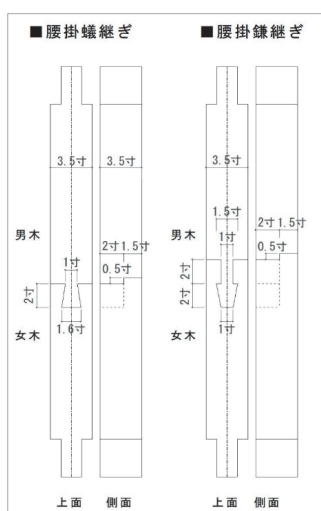


図1 継手加工寸法図

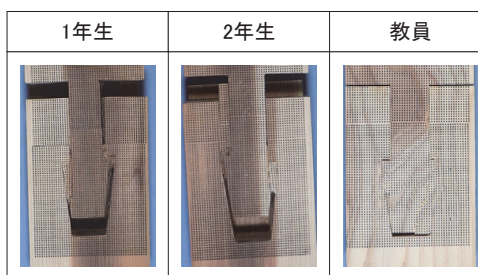


図2 鎌継ぎの破壊後の様相

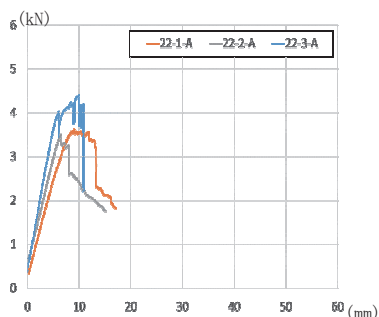


図3 蟻継ぎの荷重-変位関係(教員)

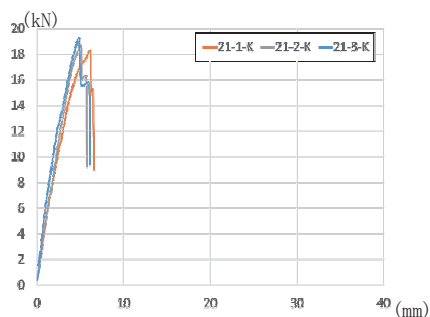
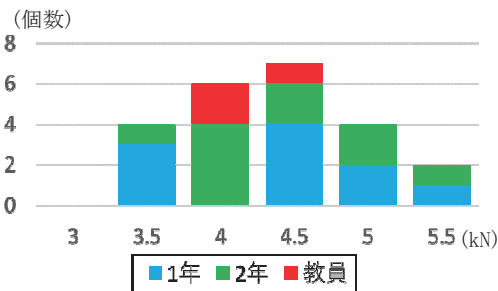


図4 鎌継ぎの荷重-変位関係(教員)

技能習熟度の違いは、引張強度試験における結果のばらつきとして現れる傾向が見られた。技能の習熟度が上がるにつれて、実験結果のばらつきが少なくなっていく傾向がある。また、

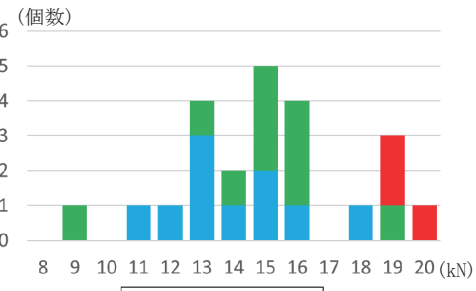
腰掛け鎌継ぎについては、強度性能にも加工者の技能習熟度の違いが現れる。これら継手の強度性能は、継手部分でのかみ合わせの精度が低い場合では引張強度も小さくなるといえるが、見た目の精度だけでは評価は困難である。継手内部での加工精度も確認できれば、構造性能の評価に繋がるものと考えられる。

木材の継手に関する引張強度実験を通して、手加工技術の技能習熟度が数値的なデータとして可視化できることを示す結果となった。継手加工についての技能の習熟度を、見た目での判断だけでなく力学的な視点を導入することで、客観的な評価基準を設けることができる。さらに、継手の構造が複雑になるほど、技能習熟度が力学的性能に反映されるものと推測される。



蟻継ぎ	全体	1年生	2年生	教員
平均	4.18	4.17	4.29	3.85
標準偏差	0.756	0.705	0.664	0.487
変動係数	0.181	0.169	0.155	0.127

図5 蟻継ぎの最大強度



鎌継ぎ	全体	1年生	2年生	教員
平均	14.50	13.54	14.19	18.75
標準偏差	2.814	2.100	2.470	0.477
変動係数	0.194	0.155	0.174	0.025

図6 鎌継ぎの最大強度

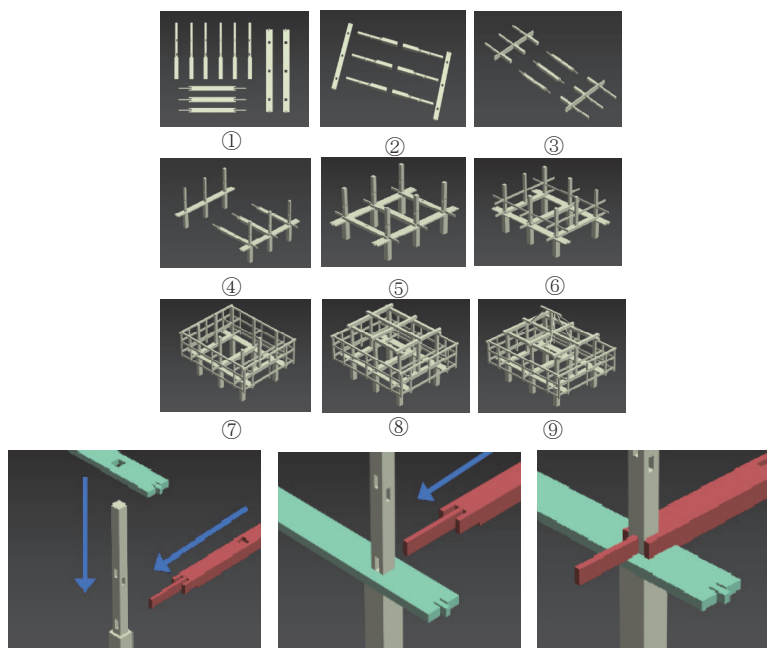
(2) 高倉の構造把握の取組み

一般的な高倉は床下の柱部分と床上部分を構造的に分ける形式を取っている。八丈島の高倉は1本の柱を床桁の高さから削り出して細くし、それを通し柱として構造を一体化した形式である。柱の下部の断面寸法は280×280、柱の上部は170×170となる。また、直材を入手しにくい環境であったため床梁にシイの屈曲材を使用している。床梁、床桁の両端がフォーク状に3分岐して加工が施されており、真ん中が長く伸びた形になっている。六脚倉の保存修理工事において3本の床梁の両端の仕口6箇所のうち5箇所の破損が確認された。ホゾの先端で外壁を支える構造となっており、そこに荷重が集中したためと考えられる。八丈島の高倉には四脚倉、六脚倉、十二脚倉があり、四脚倉の柱には自然木を使用した足固めがある。また、十二脚倉は通し柱を10本、床束を2本使用しており、中2本の柱は床下までで留まっている。いずれのどの倉においても本論文で取り扱う六脚倉と施工方法、形状、部材、接合部に大きな差はない。

建て方手順を示す。

- ①主要構造部の柱6本、床桁2本、床梁3本を用意する
- ②柱と床桁を並べる
- ③柱と床桁を接合し、中央部に床梁を並べる
- ④接合した柱と床桁を立て、そこに床梁を差し込む
- ⑤もう一对の柱と床桁を徐々に寄せて④と接合する
- ⑥床上から柱を2本足し、貫で柱同士を緊結する

- ⑦床桁と床梁の先端を縁側柱のホゾ穴に差し込み、縁側柱を貫で緊結する
- ⑧柱に桁と梁をかけ、中央に桁をかける
- ⑨桁に棟束と叉首を取り付け、棟木をおく



2階の柱頭と桁梁、スパン梁の仕口を上記に示す。

調査より明らかになった仕口より、今後、建物の構造的な検証を行う。

5. 歴史文化地域の地盤環境を踏まえた防災技術の開発

担当者：深川良一・里深好文・小林泰三・藤本将光

(1) 清水寺における地盤災害調査・観測・変状予測

清水寺に関しては、引き続き重要建造物後背斜面内地下水流動特性の把握、斜面安定性評価のためのモニタリングシステムの開発を目指す。降雨に伴う土壌水分の変動と斜面変状の関連性を現地調査結果から確認する。それらの結果を踏まえた浸透解析、動的安定性評価を実施する。重要建造物後背斜面において雨量、間隙水圧、変位量を長期モニタリングし、水分変動に伴う変状および斜面崩壊発生機構を検討した。

本年度は、清水寺の雨量・地下水位と湧水発生場所の画像データをもとに、降雨時における地下水位の変動特性や湧水の発生状況を明らかにすることを目的としている。無降雨期間が4時間継続したものかつ、累加雨量10mm以上を対象降雨イベントとして分析を行っている。地下水位はリニアメント東側に位置する奥之院後背斜面の4地点、リニアメント西側に位置する子安塔付近の2地点で計測している。湧水に関してはリニアメント東側の3地点で観測を行っている。

奥之院後背斜面の4地点は、累積雨量の増加に伴い地下水位の最大値も増加するが、その後一定の値が計測されることが確認された。また、湧水は発生することが確認された。発生状況に関しては、降雨後すぐに発生するのではなく、数時間後に発生していた。一方で、夜間の画像は視覚的な判断が困難であるという課題も見つかった。

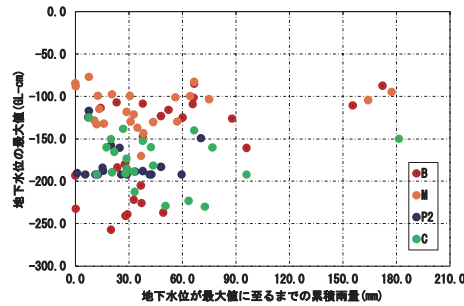


図1 新規の地下水位観測孔の計測および変動特性

(2) 世界遺産・寺山炭窯跡石積み擁壁の再崩壊状況調査

研究協力者：酒匂一成教授（鹿児島大学大学院）、藤井大祐氏（鹿児島市教育委員会文化財課 世界遺産係主査）

【研究背景・目的】

鹿児島の世界遺産である寺山炭窯跡前面の石積み擁壁は、2019年の梅雨前線に伴う集中豪雨により、まず6月28日に擁壁の小規模崩壊が発生、次に7月1日に寺山炭窯跡後背斜面が大規模崩壊し、崩壊土砂が炭窯跡を襲い、甚大な被害を受けた。その後、被災状況の調査結果に基づいて復旧計画が提案され、周辺斜面対策および石積み擁壁の積み直しが実施されたが、完了直後の2023年3月18日4:35～4:40に再崩壊した。その後、石積み擁壁再崩壊の原因究明がなされ、種々の要因が再崩壊に影響を与えていることが明らかにされた。再崩壊後の原因究明は1年半近くに及んだ。2024年度は、再崩壊防止対策工について詳細な検討を加えた。

【研究成果の詳細】

寺山炭窯跡の保全に関しては、鹿児島市集成館地区整備活用専門家委員会が中心になって検討が進められている。メンバーのうち深川は、2024年8月22日、12月16日の2回、この専門家委員会に指導・助言者として参加し意見を述べた。同委員会の指導・助言者は他に北村良介名誉教授（鹿児島大）、酒匂一成教授（鹿児島大）、中井将胤氏（文化庁文化資源活用課文化財調査官）他1名（内閣官房産業遺産の世界遺産登録推進室）である。また、専門家委員会の開催に先立って、8月7日、8月21日、11月25日の計3回、酒匂教授、藤井氏等とのWeb会議に参加し、技術的課題に対する意見を述べた。

■以上の検討を踏まえて復旧工事の概要が固まってきた。再崩壊に影響を及ぼした要因別に具体的な対策の概要を以下に示す。

1) 鉛直に積まれた石材

石積み擁壁を鉛直に積み上げることは、力学的には、①石積み擁壁背面の土圧が強くなり、擁壁の安定性が低下する。②鉛直積みでは水平方向の抵抗はほとんど期待できない、等の理由により、実際にはかなり具体的事例が少ないのが実情である。しかし、崩壊前の石積み擁壁はほぼ鉛直に積み上げられていたことから、鉛直性を維持できるよう繊維系材料で斜面の安定化を図るジオテキスタイル工法を選択することを提案した。

2) 締固め工法の差異による新規盛土の密度差

石積みの背面は形状が複雑になるため、場所によって締固め方法を変えざるを得ず、そのことが擁壁の不安定化につながった。そこで、適切な含水比の締固めやすい材料を選択し、場所

による密度差が生じないように丁寧な施工を心がけることを提案した。

3) 施工方法・速度

再崩壊時の石積み擁壁においては、石積み自体が鉛直であり、また締固め施工時に特に石積み前面の水平方向への拘束がなされたわけでもなかったため、結果的に締固め時に擁壁が前面にはらみだす恐れがあった。また、特に慎重に施工速度が選択されたわけではなく、不均質性が助長され、そのことが再崩壊につながった。そこで、①ジオテキスタイルを設置し締め固める際も、鉛直に積まれた石積みが前方に孕み出さないよう石積み前面から拘束力を作用させる、②締固めに使用される粘土系材料は最適含水比より若干乾燥した側で最大の強度を発揮するため、施工を急ぎすぎないことが重要である、③ジオテキスタイルと石積みの接合には十分留意することを指摘した。

【今後の研究計画・展開】

現時点において施工計画はほぼ固まってきているが、施工方法の詳細については、例えばジオテキスタイルと石積みの接合部をどうするかなど決定していないこともあるため、鹿児島大・酒匂教授らとともに継続的に助言を行う予定である。また、ほぼ鉛直に積み上げられた石積み擁壁が力学的に不安定であることは力学的には明瞭であるが、元々の擁壁がその状態で崩壊せずに長期間安定していたことも事実である。このなぞの解明も含めて今後明らかにし、より信頼のおける対策工となるよう施工計画を改善していく予定である。

6. 歴史的実建造物の耐久性評価調査

研究担当者：福山智子

【研究目的】

本研究の目的は、歴史的な鉄筋コンクリート（RC）建造物の経時変化の記録と、それに基づく建造物耐久性向上と延命に関する研究である。

今年度は、RC 建造物の維持管理について実建造物調査と実験の両面から研究を行った。

調査は軍艦島の RC 建造物を主な対象とし、経年変化の把握と劣化外力について観察・写真撮影を行った。軍艦島は 120x600m 程度の海に囲まれた埋立て島であり、海水による鉄筋腐食が主な建造物劣化要因としてみなされているが、世界遺産の一部を構成する建造物群としてその維持管理を考えた場合、建造物の経年変化を把握しその対策についても考慮する必要がある。本研究では建造物群の定点写真を撮影し、それらの経年変化から、建造物が受けている劣化外力の種類やその程度、劣化の進行を把握した。

実験については、超音波伝播速度や AE の測定を導入し、応力に対するひび割れの進展状況などを 3 次元画像として把握し、建造物が発する電気などの物性との相関について検討した。

【研究成果の詳細】

本稿では、軍艦島の調査結果について報告する。

担当者が調査を開始した 2011 年以降に撮影された写真の整理と、これに並行して過去写真と同アングルの写真の撮影を継続し、建造物の劣化進行状況を明確にした。これまでの調査では、図 1 のような鉄筋腐食進展に伴う部材の破壊の経時変化を主に報告してきた。その

過程で、軍艦島の環境が特殊であることから、構造物群劣化に影響する要因は、通常の塩害だけでなく風雨や波浪、構造物の自重などによる破壊が考えられた。

ここで、近年では土木学会や建築学会において鉄筋腐食に影響する水の挙動が特に注目されている。本稿では、エフロレッセンスや部材の汚れなど、特にRC部材中を移動する水がかかわると考えられるいくつかの写真を紹介する。

図2は14号棟のエフロレッセンスの様子を示したものである。写真から、ひび割れ部に沿って白い水酸化カルシウムが滲出している様子(図2(a)–(d))や水酸化カルシウムがつらら状になっている様子(図2(d))が観察できた。エフロレッセンスはコンクリート中の水の移動を示唆しており、これにより腐食が発生しやすい環境と考えられる。

図3は、65号棟のエフロレッセンスの経時変化を撮影したものである。つらら状のエフロレッセンスが伸長しているだけでなく、既存のひび割れに沿った水酸化カルシウムの滲出が見られ、屋上からの水の浸入を示唆している。

図4、図5は、65号棟の緑色のしみの経時変化を撮影したものである。緑色のしみは、藻類の存在を示唆しており、最上階でなくとも外部に面した窓を有する場合には雨水などに由来する水の供給があると考えられる。このような水の供給がある箇所では鉄筋腐食の進展が観察されることが多い。

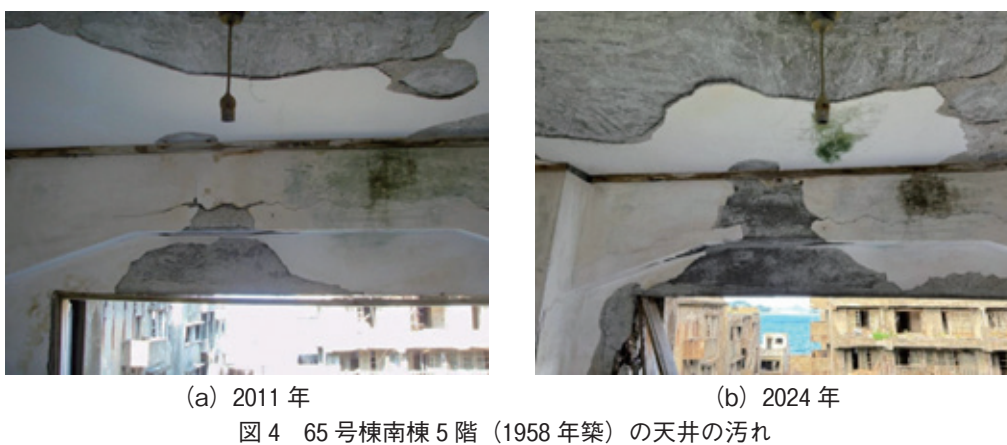
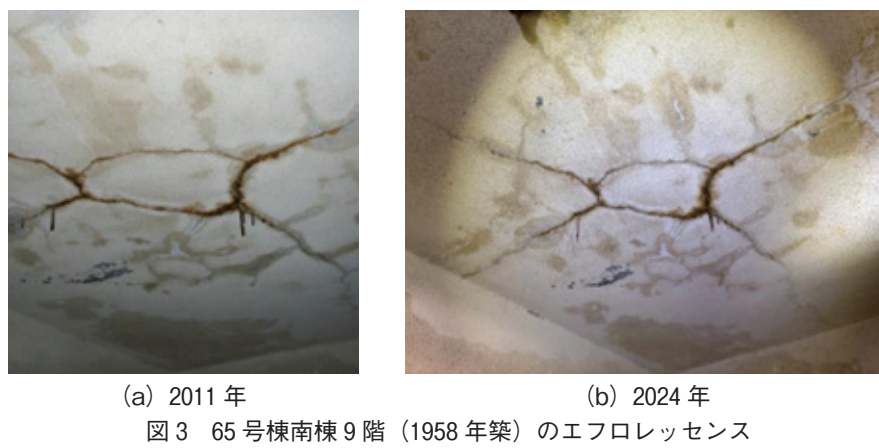


(a) 2017年



(b) 2024年

図1 65号棟南棟2階(1958年築)の梁の鉄筋腐食





(a) 2017年

(b) 2024年

図5 65号棟南棟6階（1958年築）の天井の汚れ

【今後の研究計画・展開】

今後も島内全構造物の定点観測を継続して経年劣化の種類やその進行速度を把握・整理し、構造物の維持管理だけでなく歴史的資料としても残していきたいと考えている。特に、水分の移動については、関連する研究分野でも関心が高く、実証資料としてデータを蓄積する予定である。

注：軍艦島のRC構造物調査は、日本コンクリート工学会（調査代表：東京大学・野口貴文教授）、東京理科大学、芝浦工業大学、名城大学、琉球大学その他の建築材料の耐久性に関する研究室・研究機関が参画する共同プロジェクトであり、機関ごとに構造物に関する調査を実施している。調査と写真撮影は長崎市の特別な許可により実施された。

