

学位申請論文

既存木造建築物の劣化部位の材料特性評価のための  
非／微破壊的手法の適用性および樹脂充填による補強方法  
に関する研究

FUNDAMENTAL STUDY ON DETECTING INTERNAL DEFECT OF TIMBER BY NON / MICRODESTRUCTIVE  
METHOD AND ITS MECHANICAL IMPROVEMENT WITH RESIN FOR EXISTING WOODEN BUILDINGS

2019年3月

大塚 亜希子



「既存木造建築物の劣化部位の材料特性評価のための非／微破壊的手法の適用性および樹脂充填による補強方法に関する研究」

目 次

第 1 章 序論

|                       |   |
|-----------------------|---|
| 1.1 研究の背景             |   |
| 1.1.1 はじめに            | 1 |
| 1.1.2 木材の劣化           | 1 |
| 1.1.3 木造建築物の劣化診断方法    | 3 |
| 1.1.4 文化財建築物に対する補修・補強 | 5 |
| 1.2 研究の目的             | 6 |
| 1.3 本論文の構成            | 7 |

第 2 章 木造建築物の適正な維持管理に関する既往の研究

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 2.1 はじめに                      | 9  |
| 2.2 非・微破壊検査による劣化状況調査に関する既往の研究 | 9  |
| 2.3 補強に関する既往の研究               | 14 |
| 2.4 まとめ                       | 18 |

第 3 章 既存木造建築物の特に強度低下部位の材料性能評価のための非・微破壊的手法の適用性

|                        |    |
|------------------------|----|
| 3.1 はじめに               | 21 |
| 3.2 診断方法               | 22 |
| 3.3 対象建築物              |    |
| 3.3.1 対象建築物概要          | 25 |
| 3.3.2 対象建築物詳細          | 26 |
| 3.4 実験結果の比較と考察         |    |
| 3.4.1 材料特性の評価に対する検討方法  | 41 |
| 3.4.2 縦圧縮試験結果          | 41 |
| 3.4.3 縦圧縮強度と超音波伝播速度の関係 | 42 |
| 3.4.4 縦圧縮強度と穿孔抵抗値の関係   | 43 |
| 3.4.5 縦推定密度と実密度との関係    | 44 |
| 3.5 低強度域における強度推定のための展望 | 45 |

第 4 章 蟻害劣化した木造建築物の欠陥探査と樹脂充填による補強方法

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 4.1 はじめに                    | 49 |
| 4.2 欠陥探査と樹脂充填による補強に対するアプローチ | 49 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 4.3     | 超音波法による劣化探査と樹脂充填による補強法                      |    |
| 4.3.1   | 超音波法  | 50 |
| 4.3.2   | 充填樹脂の検討                                     | 51 |
| 4.4     | Step1 模擬劣化させた試験体による検討                       |    |
| 4.4.1   | 予備実験  | 52 |
| 4.4.2   | 実験概要  | 55 |
| 4.4.3   | 模擬劣化試験体に対する縦圧縮載荷試験結果                        | 56 |
| 4.4.4   | 模擬劣化試験体に対する劣化探査                             | 57 |
| 4.5     | Step2 蟻害劣化を生じさせた木材試験体による検討                  |    |
| 4.5.1   | 縦圧縮載荷試験                                     |    |
| 4.5.1.1 | 実験概要  | 58 |
| 4.5.1.2 | 劣化探査  | 59 |
| 4.5.1.3 | 目視評価  | 60 |
| 4.5.1.4 | 蟻害圧縮載荷試験結果                                  | 61 |
| 4.5.1.5 | 樹脂の充填性の評価                                   | 62 |
| 4.5.2   | 曲げ載荷試験                                      |    |
| 4.5.2.1 | 実験概要  | 63 |
| 4.5.2.2 | 蟻害曲げ載荷試験結果                                  | 65 |
| 4.5.2.3 | 曲げ強度の推定                                     | 67 |
| 4.5.2.4 | 劣化探査  | 68 |
| 4.5.2.5 | 樹脂の充填性評価                                    | 69 |
| 4.5.2.6 | 破壊性状  | 70 |
| 4.6     | Step2 蟻害劣化を生じさせた木材試験体による検討<br>～接合部材を対象とした検討 |    |
| 4.6.1   | 実験概要  | 71 |
| 4.6.2   | 蟻害接合部せん断曲げ試験                                | 72 |
| 4.6.3   | 蟻害接合部せん断曲げ試験結果                              | 73 |
| 4.6.4   | 樹脂の充填性評価                                    | 78 |
| 4.7     | まとめ   | 82 |

## 第5章 結論および今後の課題

|     |      |    |
|-----|------|----|
| 5.1 | はじめに | 85 |
| 5.2 | 結論   | 86 |

### 付録1：非・微破壊的手法による既存建築物の材料性能評価～駒込樹林館の例～

|     |              |    |
|-----|--------------|----|
| 1   | はじめに         | 87 |
| 2   | 調査対象         | 87 |
| 3   | 調査対象の構法調査    |    |
| 3.1 | 構法の概要        | 88 |
| 3.2 | RC壁と木梁接合部    | 89 |
| 4   | 材料の耐久性調査     |    |
| 4.1 | 調査項目         | 90 |
| 4.2 | RC造部における調査概要 |    |

|       |                  |     |
|-------|------------------|-----|
| 4.2.1 | 調査概要             | 90  |
| 4.2.2 | 調査項目             | 90  |
| 4.2.3 | 調査結果および考察        | 92  |
| 4.3   | 木造部における耐久性調査     |     |
| 4.3.1 | 調査項目             | 95  |
| 4.3.2 | 調査結果および考察        | 95  |
| 4.3.3 | 推定式を用いた蔵における強度推定 | 96  |
| 5     | 火害調査             |     |
| 5.1   | 調査項目             | 97  |
| 5.2   | 調査結果および考察        | 98  |
| 6     | まとめ              | 100 |



# 第 1 章

## 序論



# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 はじめに

日本において木材は紀元前より人々の生活において様々な方法で活用されてきた。縄文時代になると食用としての木の実などの収穫だけではなく、森林伐採による焼畑農業が始まり、燃料としての活用も始まった。建築材料として活用されるようになったのは紀元後である。例えば、現存する世界最古の木造建築である法隆寺の五重塔は、飛鳥時代の607年に創建されており、現在も数多くの木造建築が実存している。日本において木材が広く使われる建築材料となった要因としては、日本は森林に恵まれた環境であり、また木材が日本の気候にあった材料であることによるところが大きい。現在でも森林率67.0%（林野庁報告，平成29年3月現在）と木材の供給が豊かな環境である。また、日本の高温多湿な夏の蒸し暑さと冬の乾燥に木材の持つ調湿性は効果が高いことから、長く建築材料として使用されている。

### 1.1.2 木材の劣化

木材は建築に対し使いやすい材料である一方で、材料性能の把握が難しく、様々な劣化を受けやすい材料でもある。木材の劣化とは、「木材が使用もしくは時間の経過とともに、様々な要因によって、本来の色、強さなどの性質が変化し、木材の本来持つ性能や機能が低下し、経済的価値が低下すること」<sup>[1-1]</sup>である。木材の主成分はセルロース、ヘミセルロースとリグニンであり、機械的損傷を除けば、物理的要因、生物的要因によって成分が分解されることで材料性能が低下したり、外観が変化したりする。物理的要因としては紫外線、光、酸素、温度、水分など、生物的要因としては腐朽菌・カビ・虫などが挙げられる。特に生物的要因のである腐朽菌とシロアリによる蟻害は、強度劣化を引き起こす原因とされている。以下に腐朽菌およびシロアリによる蟻害の特徴を述べる。

#### A 腐朽菌

腐朽菌による腐朽には褐色腐朽、白色腐朽、軟腐朽などがあり、腐朽の進行には水分・空気（酸素）・温度などが重要である。室内における繊維飽和点での含水率は、樹種によらず28~30%であるとされており、含水率は40%~150%の範囲において腐朽は進行しやすい。一方、酸素の減少に応じて腐朽しにくくなり、水中などでは腐朽は進行しない。腐朽菌の種類による腐朽の違いについては、褐色腐朽は褐色化して亀裂が入ること（図1-1(a)）、白色腐朽は白色化し繊維の海绵状化すること（図1-1(b)）、軟腐朽は表面が軟化し脱落しやすくなること（図1-1(c)）などが特徴である。<sup>[1-1]</sup>

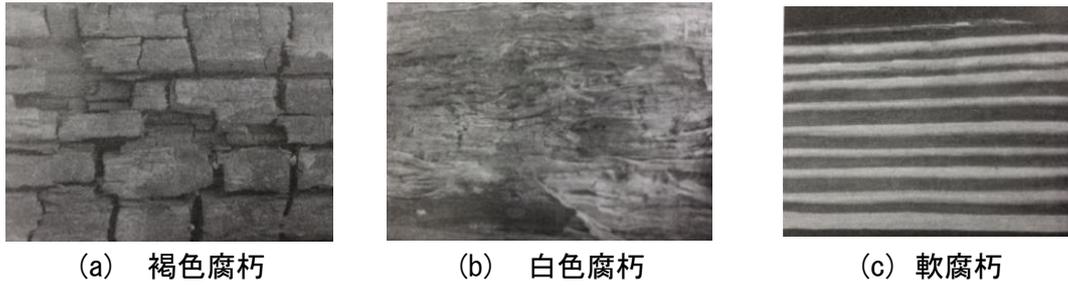


図 1-1 腐朽菌による腐朽の様子<sup>[1-1]</sup>

**B シロアリによる蟻害**

虫害を引き起こす甲虫類は「(木材)穿孔性昆虫類」「食材性昆虫類」などと呼ばれており、シロアリやキクイムシ等もそれに分類される。

シロアリは乾材シロアリ・湿潤シロアリ・地下シロアリの3つに分類される。乾材シロアリは気乾状態にある立枯木などを食害し、巣は作らずに生活している。湿潤シロアリは湿った朽木中に穿孔して生活し、地下シロアリは死木中や土中に巣を作り、蟻道を伸ばして枯木や建築物を摂食する。日本に分布するシロアリのうち、特に住宅における被害が多いシロアリは地下シロアリのイエシロアリとヤマトシロアリである。イエシロアリは水分を運搬する能力があるため行動範囲は広く、加害速度も早い。ヤマトシロアリは比較的湿った木材を好み、水分が多い場所に生息しているため、並行して腐朽が発生することもある。また、近年アメリカカンザイシロアリというカンザイシロアリの被害も日本において広がっている。食害の速度は遅いが、母屋や垂木など屋根裏から侵入することが多いために発見されにくく被害が拡大するケースが多い。シロアリが好む木の傾向としては、針葉樹>広葉樹，早材>晩材，辺材>心材となっている。<sup>[1-1]</sup>



図 1-2 シロアリによる蟻害の様子

### 1.1.3 木造建築物の劣化診断方法

木材の劣化の中でも、特に生物的劣化は強度低下に影響することは前項で記述した通りであるが、その劣化診断方法については、木材・木質構造の維持管理—劣化診断マニュアル<sup>[1-2]</sup>にて定義されている。劣化診断の種類を表 1-1 に示す。劣化診断は一次診断として数年間に1度の頻度で所有者や専門家によって行われるもので、不具合や劣化の早期発見を目的としている。劣化診断の方法としては、表 1-2 に示す3段階がある。

一次診断は構造部材について目視、打診、触診などで主に腐朽と虫害による劣化部位を抽出するものである。しかし、一次診断で適切に判断するためには、一定以上の経験に基づいた技術が必要となり、個人の裁量にかかるところが大きい。経験を積んでいくことで、視診にて菌糸や蟻道の様子から、劣化の種類も判断できるようになる。

二次診断については、一次診断で劣化の可能性があると判断された部位について、計測機器を使用して測定する方法である。表 1-3 に示すような含水率計・衝撃打込器・超音波測定・穿孔抵抗・電磁波・AE センサーなど携行性に優れた小型で軽量の機器で測定を行う。

三次診断は、木材の劣化状態を詳しく正確に評価するために、現場で採取したサンプル等に対して生物調査や強度測定を行うものである。現場において検査装置を用いた調査を行うこともある。生物的検出では時間コストはかかるものの腐朽について正確に判断することが可能であり、強度試験では木片を切り取るため損傷は大きいものの強度を的確に知ることができるという利点がある。

表 1-1 劣化診断の種類<sup>[1-3]</sup>

| 劣化診断           | 期間          | 実施者                       | 内容                 |
|----------------|-------------|---------------------------|--------------------|
| 日常診断           | 巡回時         | 所有者・管理者                   | 重点項目を中心とした簡単な診断    |
| 定期診断<br>(劣化診断) | 数年毎         | 所有者・管理者<br>/専門家 (木材劣化診断士) | 一次診断 (不具合や劣化の早期発見) |
| 重点診断           | 不定期         | 専門家 (木材劣化診断士)             | 二次診断 (不具合部分の精密診断)  |
| 不定期診断          | 台風・<br>地震の後 | 所有者・管理者<br>/専門家 (木材劣化診断士) | 不具合の発見             |

表 1-2 劣化診断方法<sup>[1-3]</sup>

|      |   |
|------|---|
| 一次診断 | 目視、打診、触診および突き刺し診による劣化診断で、訓練された検査員が、主要構造部材を検査する。明らかな劣化や、劣化の可能性のある部位を抽出するのが目的。              |
| 二次診断 | 現場用の機器によるより定量的な劣化診断。計測は非破壊検査、材料の強度 (欠損率) に関するデータ等を収集する。一次診断と二次診断は同時に行うことがある。              |
| 三次診断 | 現場で採取したサンプルについて、専門の検査機関において、劣化の種類や程度を精密に判定する。腐朽の有無や程度、昆虫の種類等を同定する。一次・二次診断の現場からのサンプルを検査する。 |

表 1-3 二次診断に使われる機器<sup>[1-3]</sup>

| 方法                                      | 原理   | 使用機器                       |
|---|------|----------------------------|
| 機器を押しあてて電気抵抗あるいは静電容量を測定                 | 電気   | 含水率                        |
| 金属ピンを一定衝撃力で打ち込み、挿入深さを測定                 | 衝撃打込 | ピロディン、プローブなど               |
| 発信用および受信用のプローブを押しあてて、超音波伝搬速度 (伝達時間) を測定 | 超音波  | ウッドポールテスター、パンジッド、ドクターウッドなど |
| ドリルで穿孔しながらトルクをモニター                      | 穿孔抵抗 | レジストグラフなど                  |
| 電磁波を発射し、反射波を分析                          | 電磁波  | 電磁波レーダーなど                  |
| 白蟻食害による微小破壊に伴い発生するアコースティックエミッションをモニター   | AE   | AE センサー                    |

### 1.1.3 文化財建築物に対する補修・補強

文化財建築物に対して現在行われている補修・補強は、表 1-4 に示すように破損状況により小修理・維持修理・根本修理の 3 つに分類されている。修理の際には建築物の健全な部材はそのまま保持され、劣化した部材を根継ぎなどの伝統工法によって新しい健全な木材への部分的な取替え（図 1-3(a)）が実施され、破損状況が著しい場合には、解体修理などが実施されている（図 1-3(b)）。さらに近年では高性能繊維を被覆する SRF 工法や炭素繊維による修復（図 1-3(c)）なども適用されている。しかし、これらの方法では文化財建築の文化的・意匠的価値を維持できないケースや、独特の形状の部材に対しては前述の手法の適用が困難なケースもある。一方で、できるだけ現状の部材を生かして使用し、デザイン形状を維持することができる樹脂充填による部材補強は近年においても検討されている<sup>[1-6]~[1-9]</sup>。しかし、充填による補強に対する精度の安定性には不安が残り、また非破壊での充填検証や補強効果の確認方法は未だ確立されていない。

表 1-4 保存修理の種類<sup>[1-4]</sup>

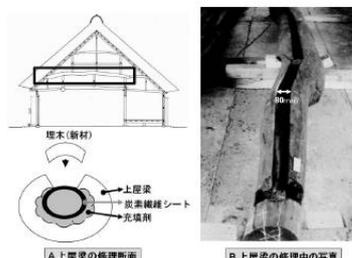
| 劣化診断 | 期間   |
|------|--|
| 小修理  | 日常管理における破損部分の補修，日常的に傷みやすい屋根や壁の部分補修，床板の張り替えなど   |
| 維持修理 | 経年による破損を補修し，建造物としての機能を維持するため，周期的に行う修理，「屋根葺替」や「塗装修理」など  |
| 根本修理 | 柱や梁など主要構造部にまで破損が及んだ場合に建造物を解体して各部材の補修を行い，建造物を健全な状態に回復させる修理。全ての部材を解体して組み直す「解体修理」や，軸部の一部を解体せずに行う「半解体修理」など |



(a) 根継ぎ



(b) 解体



(c) 炭素繊維による修復例<sup>[1-5]</sup>

図 1-3 修復例

## 1.2 研究の目的

本研究においては、伝統建築の保存や木質材料の積極的な利用が謳われる近年において、建築をなるべく壊さずに劣化状況を定量的に把握する非・微破壊による劣化状況調査や建築をなるべく壊さずに補強する方法について検討を行う。

木材の数多くある劣化原因の中の1つの要因に絞った強度低下の研究は行われてきているものの、既存建築物では単独の要因による劣化のケースはほとんどなく、いくつかの因子が複合した劣化によることが一般的であり、それぞれの要因に分離し把握することは困難である。特に、シロアリによる蟻害では木材内部を主に食害していくため表面から目視により劣化の程度を判断することが難しいケースも多くある。

また、表面からボロボロと剥がれ落ちることが多い腐朽による劣化に対し、蟻害劣化部材は劣化の程度によっては蟻道に樹脂等を充填する事で部材を使用したまま表面に損傷を与えずに部材の補強を可能とする。

以上のことから、本研究においては、蟻害劣化による強度低下に対する診断方法と材料強度推定手法の提案を行うとともに、蟻害劣化した部材に対して樹脂充填による補強方法を提案し、非破壊によって樹脂充填の検証および補強効果の確認を行う方法を検証する。

### 1.3 本論文の構成

本論は全 5 章，および 5 章までで検討した提案内容の既存建築物への適応例を示した付録により構成されている。以下に各章の概要を示す。

#### 第 1 章 序論

研究の背景や目的について述べる。

#### 第 2 章 木造建築物の適正な維持管理に関する既往の研究

国内で研究が進められている劣化状況調査及び補強に関する既往の研究について述べる。

#### 第 3 章 既存木造建造物の特に強度低下部位の材料性能評価のための非/微破壊的手法の適用性

既存木造建築物から取り出した木質部材に対して，非破壊・微破壊・破壊の各種試験の実験を行い，低強度域における強度推定のための分析手法と，含水率を考慮した非・微破壊試験による材料性能評価方法について述べる。

#### 第 4 章 蟻害劣化した木造建築物の欠陥探査と樹脂充填による補強方法

蟻害劣化を模擬した木材試験体を対象とした超音波による非破壊損傷評価と樹脂充填による補強効果の確認，および模擬劣化試験体と実際に蟻害劣化を生じさせた木材試験体に対して提案手法の適用性の検討について述べる。

#### 第 5 章 結論および今後の課題

本研究で得られた知見についてまとめ，今後の検討課題を述べる。

#### 付録

非・微破壊的手法による既存木造建築物の材料性能評価について，既存木造建築物に対する適応例について述べる。

—駒込樹林館における非・微破壊的手法による既存建造物の材料性能評価

## [第 1 章の参考文献]

- [1-1] 木材保存学入門 改訂 3 版, 公益社団法人日本木材保存協会, 2012.4
- [1-2] 木材・木質構造の維持管理—劣化診断マニュアル—, 木材劣化診断士委員会, 公益社団法人日本木材保存協会, 2014.8
- [1-3] 木造住宅の耐震診断と補強方法 2012 年度改訂版, 一般社団法人日本建築防災協会, 2012
- [1-4] 文化財部参事官 (建造物担当) : 国宝・重要文化財建造物 保存・活用の進展を目指して, 文化庁, 2013.7
- [1-5] 趙 賢貞:木造文化座愛建造物の修理における炭素繊維の使い方—部材修復の事例を中心として—, 日本建築学会技術報告集, 第 16 巻, 第 34 号, pp.1175-1180, 2010.10

## 第2章

# 木造建築物の適正な維持管理に関する 既往の研究



## 第2章 木造建築物の適正な維持管理に関する既往の研究

### 2.1 はじめに

寺社仏閣等の伝統建築物を健全に維持し続けるためには、定期的に修理・修復が行われ適正な維持管理が行われていることが必要である。伝統建築物の維持管理は、建築基準法第3条第1項第3号により建築基準法の適用から除外され、地方自治体の条例等により管理方法などが定められている。また、より積極的な活用を目指し、2018年には国土交通省からも歴史的建築物の活用に向けて条例整備ガイドラインが発表された。

一方で、建築物を維持するためには、建築物としての安全性が確保されていることが重要である。そのためには、建築物の構造性能や部材の耐久性の把握が必要である。この場合、対象となる建築物をなるべく壊さずに劣化状況を把握することが望ましいと言える。現在、非・微破壊による劣化状況調査手法については様々な検討がなされている。また、建築物の健全性を維持するための修理・修復については、既存の伝統技術に加え、建築部材を取り替えずに補強する方法の検討が行われてきた。

### 2.2 非・微破壊検査による劣化状況調査に関する既往の研究

#### 2.2.1 非・微破壊検査の種類

木部材の劣化診断については、目視や触診に加え、非破壊試験や微破壊試験が用いられている。

非破壊試験において、超音波や応力波などの弾性波と曲げ性能との相関についての研究は、いくつか進められている。例えば、実部材に対する腐朽度と強度の関係<sup>[2-1]</sup>が高いことや、試験片のサイズを50×50×50mmとした全面圧縮試験のように全体を計測できる場合の計測値と強度との相関は高いことが指摘されている<sup>[2-2]</sup>。また、シミュレーションと応力波を用いた実部材の曲げ性能の予測<sup>[2-3]</sup>や、マイクロ波を用いた内部状態の観察技術などにより、今後生物劣化を受けた木材の強度特性の推定も可能になってくるであろうと言われている。文化財をはじめとする伝統建築物に対しては非破壊での劣化診断が望まれることが多く、また今回のように樹脂充填による補強後の充填状況確認においても大きな役割を果たす可能性がある診断方法といえる。

微破壊試験については、微破壊による劣化診断方法は打ち込み法や穿孔抵抗法などがある。元来立木の健全性を測定する機器であったため、劣化の程度を判断するのは難しいとされていたが、近年穿孔抵抗による木材の密度推定や残存性能に関する検討などが行われるようになり、診断方法の信頼性が高いとの報告もある<sup>[2-4]</sup>。ここでは、非・微破壊試験方法であるA.伝播速度測定法、B.穿孔抵抗法、C.プローブ引抜き試験法について述べる。

## A. 伝播速度計測法

伝播速度計測は、木材内部において、送信部から受信部へ超音波又は応力波を伝達させ、その伝搬する時間を計測することで木材内部の状態を評価手法である。超音波法と応力波法に分類される。

特に超音波法は、1965年にはすでに検討が進められている。角谷<sup>[2-5]</sup>によって木材内部の欠損を評価する研究として空孔、腐朽、節など空隙の違いによる縦波の音速の変化を実験的に求める検証がなされており、そのなか「腐朽の場合は腐朽に伴う材の重量減少率が増加するとともに音速が減少し、音速によるある程度進んだ腐朽部の検出は十分可能である。」と述べられている。しかし、その差はわずかであることから実用的な検出は難しかった。

森らは、生物劣化の残存性能について検討を行なっている<sup>[2-2]</sup>。強制劣化された試験片に対し、超音波法を用いて圧縮強度や曲げ強度を推定するものである。図 2-1 に縦圧縮強度と超音波伝播速度の関係、図 2-2 に超音波伝搬速度と曲げ強度の関係を示す。図 2-1、図 2-2 に示されている **Control 5% lower limit** はコントロール試験体の実験結果より求めたものであり、**Standard strength** は基準材料強度<sup>[2-6]</sup>である。腐朽試験体における縦圧縮強度と超音波伝播速度の相関性は低く、曲げ強度については正の相関が見られている。こちらの報告の範囲内では、超音波伝播速度を用いて残存強度の判断をすることは難しいとされている。

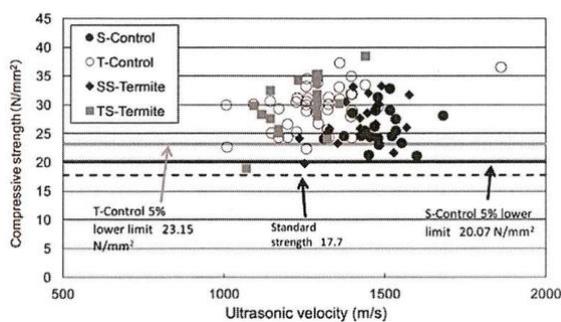


図 2-1 超音波伝搬速度と縦圧縮強度の関係<sup>[2-3]</sup>

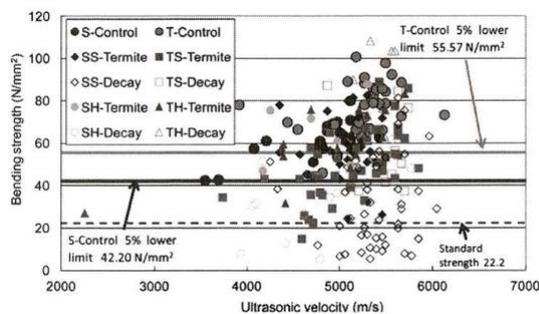


図 2-2 超音波伝搬速度と曲げ強度の関係<sup>[2-3]</sup>

## B. 穿孔抵抗法

微破壊による劣化診断方法は打ち込み法や穿孔抵抗法がある。山下ら<sup>[2-7]</sup>は穿孔抵抗による木材の密度推定の可能性を検討するために、広葉樹 27 樹種とスギの生材および気乾材での小試験体を用いて、穿孔抵抗の測定を行なっている。穿孔抵抗の平均値と密度との関係を明らかにし、穿孔抵抗から密度を導く推定式を求めている。測定時には range1(Hard Wood), range2(Soft Wood)の2種類の測定モードで測定している。図 2-3 に示すように、穿孔抵抗値には穿孔開始直後に出力値の急増区間が存在し、そのあと安定する傾向がある。実験結果より、増加区間の長さは木材の密度に依存し、密度が高い樹種では増加区間が長いことがわかっている。

また、図 2-4 に示すように、小試験体の穿孔抵抗値出力値平均と気乾密度との間に有意な正の相関関係が認められている。実大材内部の密度分布について、気乾材では密度の半径方向変化をとらえることができ、推定が可能であることが示されている。しかし、生材では孔深さが深くなるのに伴って穿孔抵抗が増加する傾向がみられている。

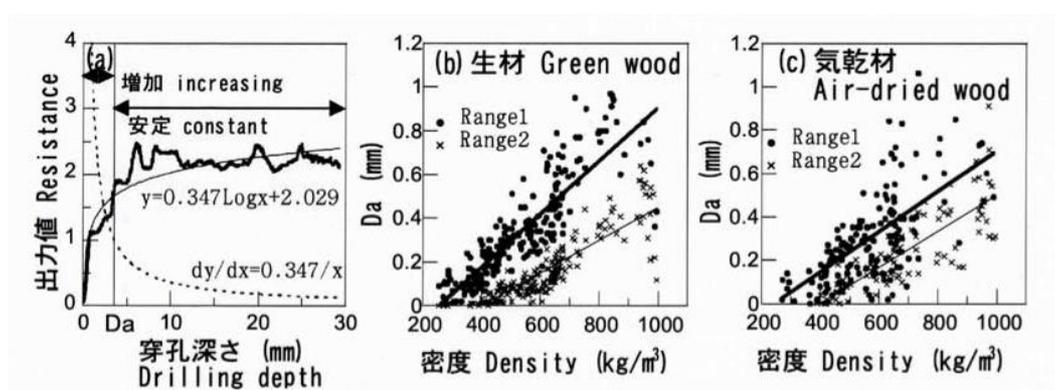


図 2-3 穿孔開始部位におけるレジストグラフ出力値の急増区間

(a): 回帰曲線のあてはめ (b) と (c): 密度と急増区間との関係

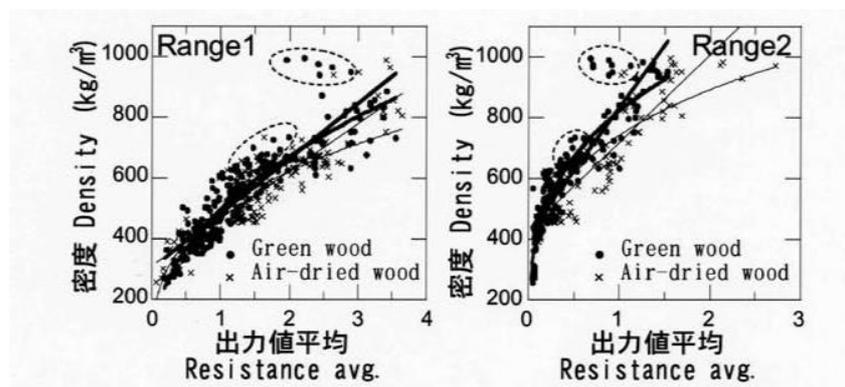


図 2-4 小試験体のレジストグラフ出力値平均とブロック気乾密度との関係

### C. プローブ引き抜き試験法

穿孔抵抗法と同様に微破壊による試験方法として、ねじの引き抜き抵抗と木材密度の相関性が高いことを利用して木ネジプローブを引き抜く際の抵抗から木材密度を推定する手法も山口<sup>[2-8]~[2-10]</sup>によって提案されている。

釘や木ネジなどが用いられていた引抜き抵抗を、ISO規格に準拠したメートルねじを使用して提案された測定方法である。

引き抜きの際の引き抜き力は、**図 2-5** に示すようにプローブ周辺の外周円筒面のせん断強度に依存する。引き抜き強度を円筒の面積で除した値を基準化引き抜き強度(NWR: Normalized Withdrawal Resistance))とし、**式 2-1** により算出する。

山口らはスギ、ヒノキ、ベイマツに対して繊維直交方向の引抜き試験を行い、基準化引き抜き強度(NWR(-RT))と木材密度の関係性を求めたものが**図 2-6** であり、**式 2-2** である。

$$\tau = \frac{P}{Rt \cdot \pi \cdot L} \tau \quad \dots \text{式 2-1}$$

$$D = 0.0032 \cdot \tau + 0.1745 \quad \dots \text{式 2-2}$$

$\tau$ : 基準化引き抜き強度(N/mm<sup>2</sup>)

$P$ : 引き抜き強度(N)

$Rt$ : プローブ刃の山径(mm)

$L$ : プローブ刃の実長(mm)

$D$ : 密度(g/cm<sup>3</sup>)

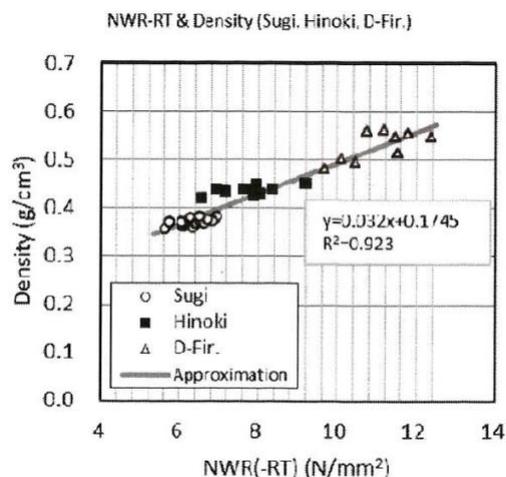
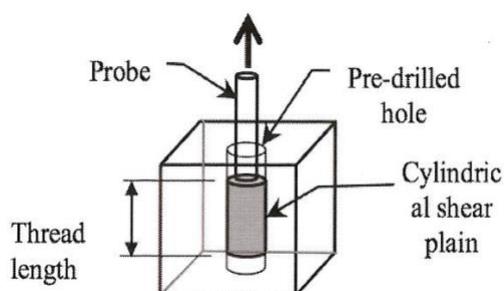


図 2-5 プローブの円筒状せん断断面図<sup>[2-10]</sup>

図 2-6 基準化引き抜き強度(NWR(-RT))と木材密度<sup>[2-10]</sup>

プローブ引抜き試験法による木材の劣化診断方法としては、ベンチマーク法と公称値法が提案されている。ベンチマーク法は、測定対象の木材と同一樹種・同一サイズの新材（健全材）を用意し、同一のプローブで対象木材とベンチマーク材の引抜強度を測定して比較することにより、対象木材の健全性を診断する方法である。ベンチマーク材については、別の健全材を用意する他に、測定対象材の健全部を健全部位として使用することもある。公称値法については、木材工業ハンドブック<sup>[2-11]</sup>に示される木材の公称密度との比較によって劣化の程度を判断する方法であり、定量的に劣化状況を診断することが可能となる。現場においては両者を組み合わせながら診断を行うことが望ましいとされている。なお、プローブ引抜き試験による健全材に対する精度が高いことは明らかとなっているが、劣化診断については事例が少なく、精度について検証の必要がある。

## 2.3 補強に関する既往の研究

1章にて述べたが、文化財建築物に対して現在行われている補修は、破損状況により小修理・維持管理・根本修理の3つに分類され、修理の際には建築物の健全な部材はそのまま保持され、劣化状況に応じた修理などが実施されている。

補強に関する既往の研究では、木材の接着においては合成樹脂が用いられた例が多いが、修理報告は少なく、合成樹脂の種類や製品についての情報は乏しい<sup>[2-12]、[2-13]</sup>。合成樹脂を使用した例としては、人工木材などが確認されている<sup>[2-14]</sup>。

近年の報告としては、エポキシ接着剤の減圧充填によって大断面集成材のドリフトピン接合部の補修を行った効果についての報告<sup>[2-15]</sup>や、蟻害による強度低下と補強の試み<sup>[2-18]</sup>、木摺り漆喰天井部材に関する補強方法<sup>[2-16]、[2-17]</sup>、炭素繊維による修復<sup>[2-20]</sup>などがある。補強に関する既往の研究について、事例の詳細を次に示す。

### A) エポキシ充填による人工材の試み<sup>[2-14]</sup>

人工木材は欠損部等を合成樹脂で補い、木材表面に合わせて成型したものである。昭和40年代より使用され始め、使用樹脂の8割がエポキシ樹脂であった。図2-7、図2-8に示すように、人工木材の圧縮強さは高いが、曲げや引張りは木材と比較すると低いということが言える。

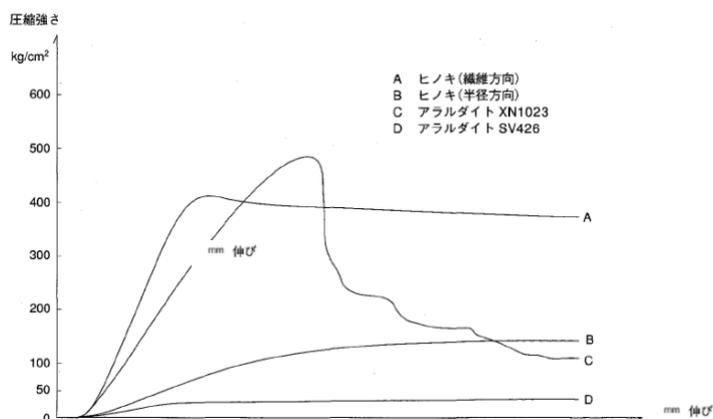


図 2-7 ヒノキおよび人工木材の圧縮強さ<sup>[2-14]</sup>

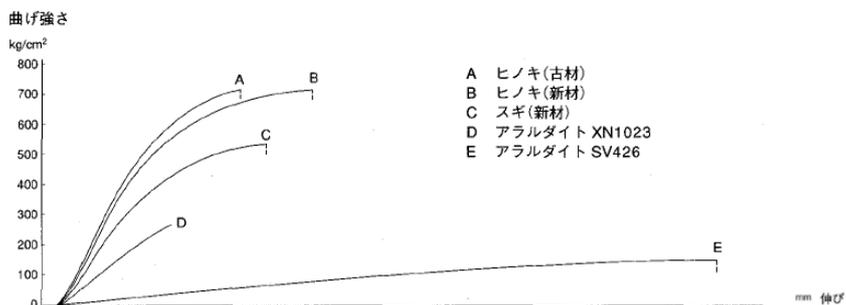


図 2-8 ヒノキおよび人工木材の曲げ強さ<sup>[2-14]</sup>

## B) エポキシ接着剤の減圧充填による大断面集成材ドリフトピン接合部の補修<sup>[2-15]</sup>

軽部らの報告<sup>[2-15]</sup>では、地震等を被災した後の構造体には再び外力を受ける場合の安全性が保証されていないのが通例であり、建て替えを余儀なくするケースが多い。しかし、費用や時間の問題から補修の選択を望まれるケースが多いため、こちらは補修を選択されたケースに対応するための検討である。地震等の外力に対して、大規模木造建築物等で一般的に用いられている鋼板挿入ドリフトピン接合部は、部材端で発生する回転モーメントを複数のドリフトピンが曲げ抵抗し、そのドリフトピンに対して木材がめり込み抵抗することで処理している。そのため、このような接合部でドリフトピンにより木材が受ける主な損傷は、曲げ変形によるめり込みと副次的に生じる割れである。その割れに対応すべく亀裂をシール材で塞ぐ方法としてエポキシの減圧充填が提案されている。その概要を図2-9に示す。実験結果より、減圧によるエポキシの充填補修によって鋼板挿入ドリフトピン接合部の体力と変形性能が回復でき、その効果としては亀裂接着、空隙充填、接着接合があると報告されている。

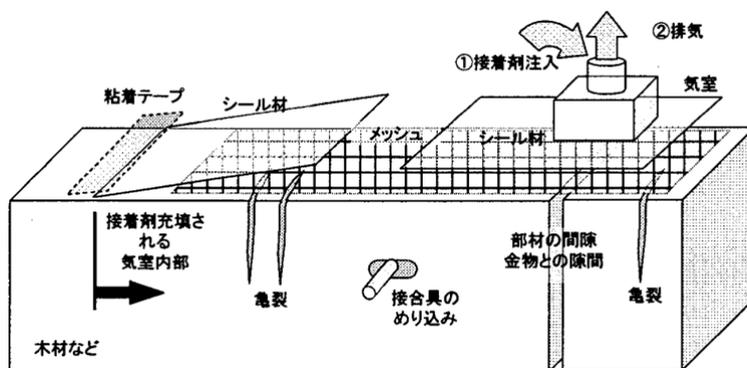


図2-9 接合部補修の概念図<sup>[2-15]</sup>

### C) 蟻害による強度低下とエポキシ充填による補強の試み<sup>[2-16]</sup>

吉武らの報告<sup>[2-16]</sup>においては、蟻害による強度劣化と補強を目的として模擬劣化試験体に対するエポキシ充填による曲げ試験と古材に対するエポキシ充填による縦圧縮強度試験を行なっている。図 2-11 に示すように、曲げ試験の試験体については、補強によりヤング係数は製材と同等の数値を示したが、節が多く評価ができない部材が多く、試験方法の見直しが必要であるとの報告であった。図 2-12 に示すように、縦圧縮試験については、ヤング係数は向上したものの、内部劣化への充填が十分でなく、蟻害孔より破壊が起こるという結果であった。施工方法について再考の必要があると考えられるが、その後の報告はない。

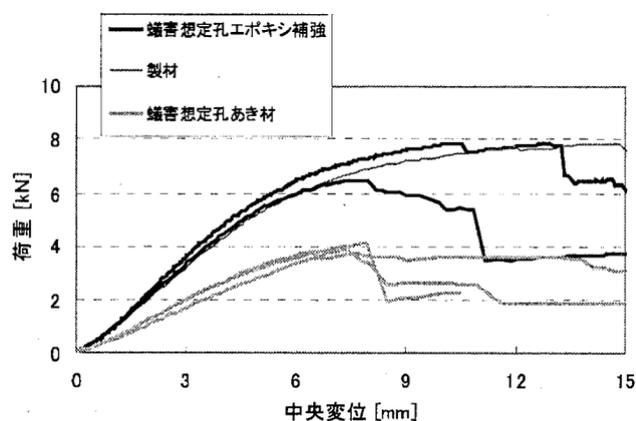


図 2-10 穴あき材の曲げ試験結果<sup>[2-16]</sup>

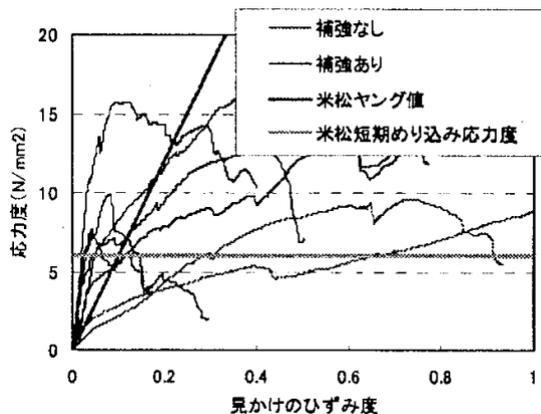


図 2-11 古材の縦圧縮試験結果<sup>[2-16]</sup>

#### D) 木摺り漆喰天井部材における補修工法<sup>[2-17]</sup>・<sup>[2-18]</sup>

構造部材以外では、非構造材も包括した建築物の耐震性の検討のために、岡らによって、木摺り漆喰天井部材に関する補強方法の提案が進められている<sup>[2-19]</sup>・<sup>[2-20]</sup>。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である。報告によると、銀行建物の漆喰天井を、浸透性アクリル樹脂による左官天井への補修工法を用いて実施工したものである（図 2-12）。天井部材の下地側からの補修施工は、仕上げ面に補修の痕跡が残らない工法である。よって、伝統的な工法で施工された部材の施工当時の仕上げ材料を保存でき、使用したまま修復が可能という利点がある。注意点としては、補修施工の際は、補修対象部材における天井支持部材の配置や、荷重のかかり方によっては、天井下地面や漆喰層に影響を及ぼす可能性があるため、下地側からの施工環境や施工性の検討および状況確認が重要であると報告されている。

#### E) 木造文化財建造物の修理における炭素繊維使用の試み<sup>[2-19]</sup>

1980 年頃から建築物に使用され始めた炭素繊維は、1995 年の阪神・淡路大震災以降に建築物において急速に普及が進んでいる。一方、木造文化財建造物分野においては近年研究が進められている。炭素繊維を使用した木造文化財建造物の一覧を表 2-1 に示す。部材の修復に用いられた施工法は、外部接合型、巻き型、埋込み型、補助型に区分でき、それぞれの破損や腐朽に応じて効果的に使い分けられている。しかし、事例は多いとはいえ、未だ普及しているとはいえない。

表 2-1 炭素繊維を使用した木造文化財建造物の一覧<sup>[2-19]</sup>

| 番号 | 建物名    | 指定  | 建立            | 構造形式                          | 修理区分 | 修理原因          |
|----|--------|-----|---------------|-------------------------------|------|---------------|
|    | 修理時期   | 所在地 | 年代            |                               |      |               |
| 1  | 新島舊旧邸  | 市有  | 1871          | 寄棟造、和棟折衷<br>木造二階建て            | 解体   | 部材の割れ<br>湾曲など |
| 2  | 本興寺方丈  | 重文  | 1617          | 入母屋造<br>本瓦葺                   | 半解体  | 災害復旧          |
| 3  | 旧岡田家住宅 | 重文  | 1674<br>180 初 | (店舗)切妻造、本瓦葺<br>(酒蔵)切妻造、本瓦葺    | 解体   | 災害復旧          |
| 4  | 神橋     | 重文  | 1904          | 木造反橋<br>高欄付                   | 半解体  | 腐朽破損          |
| 5  | 本門寺五重塔 | 重文  | 1608          | 三間五重塔婆<br>一重二重本瓦葺<br>三重以上瓦葺板葺 | 解体   | 経年弛緩<br>腐朽破損  |
| 6  | 平井家住宅  | 重文  | 170 後半        | 寄棟造、茅葺                        | 解体   | 経年変化          |
| 7  | 岩上神社本殿 | 県重  | 1736~<br>40   | 一間社隅木入春日造<br>檜皮葺              | 解体   | 経年弛緩<br>腐朽破損  |
| 8  | 関家住宅主屋 | 重文  | 170 前半        | 寄棟造、茅葺                        | 解体   | 経年弛緩<br>不同沈下  |
| 9  | 善光寺三門  | 重文  | 1750          | 五間三戸二階二重門<br>入母屋造、桐葺          | 半解体  | 雨漏り<br>建物全体歪み |

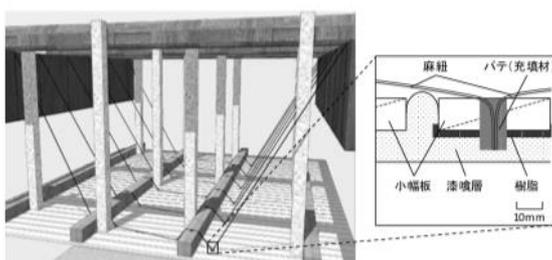


図 2-12 岩手銀行における補修部分の概念図<sup>[2-18]</sup>

## 2.4 まとめ

本章においては、木造建築物の適正な維持管理のための劣化調査方法と修理・修復に関する既往の研究について整理を行った。

木造建築物の劣化診断については、目視や触診に加え、非破壊試験や微破壊試験が用いられている。健全性を評価する評価方法から、部材の劣化状態の程度を把握するために非・微破壊の評価については、様々な検討がなされている。特に本研究において対象としている蟻害による内部劣化の診断方法としては、超音波や応力波の弾性波などを用いた診断機器の適用が好ましいと考えられる。超音波や応力波などの弾性波と曲げ性能との相関についての研究において、実部材に対する腐朽度と強度の関係<sup>[2-2]</sup>が高いことや、試験片レベルにおいては計測値と強度との一定の相関が確認されている<sup>[2-3]</sup>が、実建築レベルでの検証は未だサンプルが少なく、劣化の程度の把握が現状では難しいと言える。

また、微破壊での引き抜き抵抗については立木の健全性を測定するために使用された機器に対して、近年穿孔抵抗による木材の密度推定や残像性能に関する検討などが行われるようになり、診断方法の提案がなされるようになった。

また、伝統建築物の健全性を維持するための修理・修復については、既往の研究において、1960年代頃より合成樹脂の充填による修復や人工木材などが確認されている<sup>[2-15]</sup>、<sup>[2-16]</sup>が、当時は劣化状態の把握や補修後の強度確認等はなされていなかった。2000年以降の報告においては、様々な補修・補強方法について検討が行われるようになった。例えば、エポキシ接着剤の減圧充填によって大断面集成材のドリフトピン接合部の補修を行った効果についての報告<sup>[2-17]</sup>や、蟻害による強度低下と補強の試み<sup>[2-18]</sup>、木摺り漆喰天井部材に関する補強方法<sup>[2-18]</sup>、<sup>[2-19]</sup>、炭素繊維による修復<sup>[2-20]</sup>などである。

しかし、非破壊試験や微破壊試験による劣化診断の定量化には未だ至っていない。また、建築物の健全性を維持するための修理・修復については、既存の伝統技術に加え、建築部材をとりかえずに補強する方法について、様々な検討がなされている。しかし、修復後の回復状況の確認等には課題が残る。

## 【第2章の参考文献】

- [2-1] 田中俊成: 超音波, 弾性波によるスギ実大腐朽材の強度性能評価, 第38回日本木材学会大会研究発表要旨集, pp.122, 1998
- [2-2] 森拓郎ほか: 生物劣化を受けた木材の曲げおよび圧縮強度特性とその劣化評価, 材料, 第62巻, 第4号, pp.280-285, 2013.4
- [2-3] 山崎真理子ほか: 木質建造物の改築・改修における応力波を用いた構造部材の非破壊検査, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.1059-1060, 2007.7
- [2-4] 中村昇ほか: ティンバーメカニクス - 木材の力学理論と応用, 日本木材学会 木材強度・木質構造研究会, 海青社, 2015.
- [2-5] 角谷和男: 木材の内部欠陥と超音波音速との関係, 木材研究, 第34号, 京都大学, 1965
- [2-6] 木質構造設計規準・同解説: 許容応力度・許容耐力設計法, 日本建築学会, 2002.10
- [2-7] 山下香奈ら: 穿孔抵抗による材内密度分布の推定の試み, 森林総合研究所研究報告, 第5巻, 第1号, pp.61-68, 2006.3
- [2-8] 山口修由ら: 木ねじプローブの引き抜き抵抗を用いた木質部材の健全性診断 曲げ強度に基づく既存木造建築物中の木質部材の健全性診断, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻, 第626号, pp.607-615, 2008.4
- [2-9] 山口修由: 既存木造建築物の木質部材の健全性診断(4) -プローブの引き抜き抵抗を用いた現場診断法-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.393-394, 2014.9
- [2-10] 山口修由: 既存木造建築物の木質部位の強度健全性診断(5): 推定密度分布を用いた木材内部の劣化診断法(関東), pp.403-404, 2015.9
- [2-11] 木材工業ハンドブック(改訂4版), (国)森林総合研究所, 2004.3
- [2-12] 樋口清治: 回顧 日本における文化財修理への合成樹脂利用のはじまり, 国立民族学博物館調査報告書, 第36巻, pp.53-91, 2003.2
- [2-13] 竹之内裕ほか: 文化財建造物の修復に用いられた合成樹脂の変遷, 保存科学 No.37, pp.99-123, 1998.3
- [2-14] 竹之内裕ほか: 屋外に用いられた人工木材の劣化状況と新規人工木材の提案, 保存科学, No.37, pp.99-123, 1998.3
- [2-15] 軽部正彦他: エポキシ接着剤の減圧充填による大断面集成材ドリフトピン接合部の補修とその効果(構造), 日本建築学会技術報告集, 第10巻, 第20号, pp.93-98, 2004
- [2-16] 吉武正一他: 木質構造の蟻害に関する研究: 蟻害による強度低下と補強の試み, 日本建築学会研究報告(九州), pp.9-10, 2007.7

- [2-17] 岡健太郎他：木摺り漆喰天井部材における補修工法の開発，日本建築学会技術報告集，第 23 巻，第 54 号，pp.403-408，2017.6
- [2-18] 岡健太郎他：文化財建造物の木摺り漆喰天井における浸透性樹脂を用いた補修工法の実施工検討，日本建築学会技術報告集，第 23 巻，第 55 号，pp.789-794，2017.10
- [2-19] 趙賢貞：木造文化材建造物の修理における炭素繊維の使い方—部材修復の事例を中心として—，日本建築学会技術報告集，第 16 巻，第 34 号，pp.1175-1180，2010.10

## 第3章

既存木造建造物の特に強度低下部位の  
材料性能評価のための非・微破壊的手法の  
適用性



### 第3章 既存木造建造物の強度低下部位の材料性能評価のための非・微破壊的手法の適用性

#### 3.1 はじめに

1章で述べたように、木材の劣化診断方法については、木材・木質構造の維持管理—劣化診断マニュアル—<sup>[3-1]</sup>にて3段階に分類されている。構造部材について目視、打診、触診などで腐朽と虫害による劣化部位を抽出する数年間に1度の頻度で所有者や専門家によって行われる一次診断、一次診断で劣化の可能性があると判断された部位について計測機器を使用して測定する二次診断、木材の劣化状態を詳しく正確に評価するために、現場で採取したサンプル等に対して生物調査や強度測定を行う三次診断である。

本研究においては、図3-1に示す調査フローを用いて劣化診断を行った。一次診断においては目視による評価、二次診断においては非破壊診断と微破壊検査、三次診断には縦圧縮試験を行うこととした。二次診断においては、対象試験体の含水状態の把握のために表面含水率測定を行い、非破壊診断には今回特に内部劣化の診断に適していると言われる超音波伝播速度測定法、微破壊診断としては密度推定において精度の高さが期待できる穿孔抵抗法と引抜き抵抗試験法を採用した。

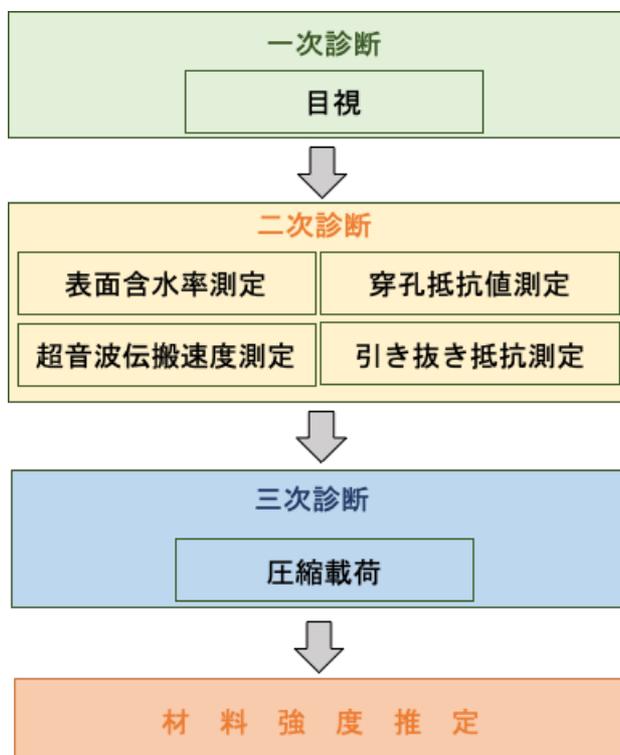


図3-1 調査フロー

### 3.2 診断方法

#### A 目視判定

JIS K 1571（木材保存剤-性能基準及びその試験方法）および雨宮<sup>[3-2]</sup>の杭の被害程度評価方法を参考に 5 段階評価で目視試験を行った。評価区分を表 3-1 に、目視グレードの評価例を写真 3-1 に示す。健全をグレード 0 とし、腐朽もしくは蟻害が大部分にみられる場合グレード 4 と分類した。また、目視調査は経験の積み重ねによる技術の向上から精度が上がるものである。本研究においては、専門家による測定は難しいため、測定者を 2 人以上とし、データの精度の向上に努めた。

表 3-1 目視の劣化グレード

| グレード | 状況                 |
|------|--------------------|
| 0    | ほぼ蟻害もしくは腐朽していない    |
| 1    | 蟻害もしくは腐朽がほとんど見られない |
| 2    | わずかに腐食・蟻道・食痕を確認    |
| 3    | 部に蟻道・食痕を確認         |
| 4    | 大部分に腐食・蟻道・食痕を確認    |



写真 3-1 目視グレードの評価例<sup>[3-9]</sup>より図を一部引用・加工

#### B 含水率測定

木材中の水分は各種の測定値に大きく影響することから、本研究においては表面含水率を測定した。ここでは、静電容量法（写真 3-2）と電気抵抗法（写真 3-3）の 2 種の試験法を使い、測定を行った。測定際には、1 箇所での測定場所につき 10 回の測定を行い、その平均値を評価した。



写真 3-2 静電容量法



写真 3-3 電気抵抗法

### C 超音波劣化測定試験

伝播速度計測は、第2章で述べたように、木材内部において、送信部から受信部へ超音波又は応力波を伝達させ、その伝搬する時間を計測することで木材内部の状態を評価手法である。第3章における劣化診断においては、対象木材の両端に超音波発信面と受信面を接触させ、透過法により超音波の伝播速度を測定した。測定については部材の切り出し前後に伴い、試験体サイズによる影響についても検討を行った。また、本研究内においては、測定前に温度 20℃にて2週間以上養生したのちに測定を行った。使用機器を写真3-4に示す。



写真3-4 超音波試験機

### D 穿孔抵抗測定試験

穿孔抵抗は、金属製のネジ状の器具を、調査対象へねじ込む際の回転方向の抵抗を測定することで強度を測定する方法である。立木や柱などの空洞の計測に有効である。測定は、柱・梁等の繊維直行方向に3mm程度の穿孔を行い、穿孔抵抗値を測定した。使用機器を写真3-6に示す。



写真3-6 穿孔抵抗測定機器

## E プロープ引抜き試験

2章で述べたように、プロープ引抜き試験は、ねじの引抜き抵抗と木材密度の相関性が高いことを利用して木ネジプロープを引き抜く際の抵抗から木材密度を推定する手法<sup>[3-3],[3-4]</sup>である。ねじプロープを用いて対象木材の表面から深さ 20mm, 40mm の位置にて、木ねじを引き抜く際の抵抗を測定し、木材工業ハンドブック<sup>[3-5]</sup>に示される木材の公称密度（表 3-2）との比較によって劣化程度の判断を行った。写真 3-7 に使用機器を示す。

表 3-2 引抜き抵抗の公称値<sup>[3-5]</sup>

|           | 公称密度(g/cm <sup>3</sup> ) |      |      | 公称引抜き強度(kN) |      |      |
|-----------|--------------------------|------|------|-------------|------|------|
|           | Min                      | Ave  | Max  | Min         | Ave  | Max  |
| スギ        | 0.3                      | 0.38 | 0.45 | 0.51        | 1.00 | 1.35 |
| トドマツ      | 0.32                     | 0.4  | 0.48 | 0.71        | 1.10 | 1.49 |
| スプルース     |                          | 0.4  |      |             | 1.10 |      |
| エゾマツ      | 0.35                     | 0.43 | 0.52 | 0.86        | 1.25 | 1.69 |
| モミ        | 0.35                     | 0.44 | 0.52 | 0.86        | 1.30 | 1.69 |
| ヒノキ       | 0.34                     | 0.44 | 0.54 | 0.81        | 1.30 | 1.78 |
| ヒバ        | 0.37                     | 0.45 | 0.55 | 0.95        | 1.35 | 1.83 |
| オウシュウアカマツ |                          | 0.45 |      |             | 1.35 |      |
| ベイツガ      |                          | 0.45 |      |             | 1.35 |      |
| カラマツ      | 0.4                      | 0.5  | 0.6  | 1.10        | 1.59 | 2.08 |
| バイマツ      |                          | 0.5  |      |             | 1.59 |      |
| アカマツ      | 0.42                     | 0.52 | 0.62 | 1.20        | 1.69 | 2.17 |
| クリ        | 0.44                     | 0.6  | 0.78 |             | 2.08 |      |
| ケヤキ       | 0.47                     | 0.69 | 0.84 |             | 2.52 |      |



写真 3-7 プロープ試験機

## F 縦圧縮試験

小試験体を作成し、万能試験機を用いて、JIS Z 2102（木材の試験方法）の縦圧縮試験方法に準じ、試験体の繊維に平行な単調増加の圧縮荷重を、破壊するまで加え、縦圧縮強さを測定した。試験体のサイズは 30×30×60mm とした。実験の様子を写真 3-8 に示す。

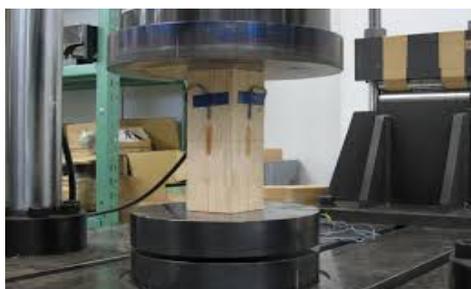


写真 3-8 縦圧縮試験の様子

### 3.3 対象建築物

#### 3.3.1 対象建築物概要

本章においては、既存木造建築物のから取り出した主に構造部材に対して、一次診断として目視評価、二次診断として超音波試験、穿孔抵抗試験、プローブ引抜き試験（一部）を行い、三次診断として縦圧縮試験（一部）を行い、材料特製の評価を行った。以下に対象建築物（表 3-3、写真 3-9）を記す。

表 3-3 対象建築物

| 建築名        | 所在      | 築年代    | 備考      |
|------------|---------|--------|---------|
| T邸         | 埼玉県加須市  | 1940年代 |         |
| 岐阜公園三重塔    | 岐阜県岐阜市  | 1917年  | 登録有形文化財 |
| O邸 蔵       | 秋田県五城目町 | 1913年  |         |
| 雲龍山 勝興寺    | 富山県高岡市  | 1584年  | 重要文化財   |
| 日光東照宮 上社務所 | 栃木県日光市  | 1616年  | 世界遺産    |
| 円覚寺正統院 開山堂 | 神奈川県鎌倉市 | 1685年  | 市指定文化財  |
| 同潤会 荏原中延住宅 | 東京都品川区  | 1928年  |         |



T邸



雲龍山 勝興寺



岐阜公園三重塔



O邸 蔵



日光東照宮 上社務所



円覚寺正統院 開山堂



同潤会 荏原中延住宅

写真 3-9 対象建築物

### 3.3.2 対象建築物詳細

#### A T 邸

#### A-1 物件情報

1940年代に建てられた埼玉県加須市に所在する木造住宅である。2015年の建て替え時に、解体時に部材を譲り受け、目視診断、超音波試験、穿孔抵抗試験、縦圧縮試験を行った。図3-2に対象物件の配置および平面図、写真3-10に対象物件の外観写真を、写真3-11に部材例を示す。

#### A-2 実験結果

目視評価結果を表3-4に示す。調査対象物件は北西方向に林、北東方向のすぐそばに川が流れるという立地であった。1-15や1-16といった林や川に面する北面の部材の劣化が著しく進行していたことに加え、南面の部材の2-4も腐朽が進行していたことから、環境の影響について判断することは難しかった。樹種については、森林総合研究所による樹種判定の結果、1-11はヒノキ、それ以外は全てスギ材であることが明らかとなった。なお、実験対象部材については、温度20℃で室温管理された部屋で部材の質量変化がなくなるまで（1ヶ月程度）養生してから各種実験を行なった。

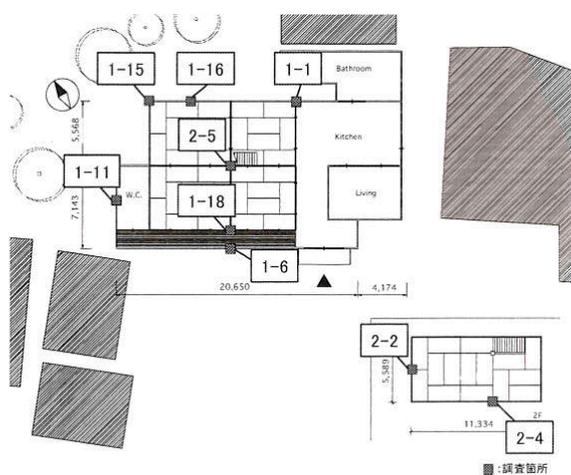


図3-2 配置および平面図



写真3-10 外観写真

表3-4 目視評価結果

| 試験体  | 部材 | 樹種 | 目視評価 |
|------|----|----|------|
| 1-1  | 柱  | スギ | 0    |
|      | 土台 |    | 1    |
| 1-6  | 柱  | スギ | 1    |
| 1-11 | 柱  |    | ヒノキ  |
|      | 土台 |    | 2    |
| 1-15 | 柱  | スギ | 3    |
|      | 土台 |    | 4    |
| 1-16 | 柱  | スギ | 0    |
|      | 土台 |    | 4    |
| 1-18 | 柱  | スギ | 0    |
| 2-2  | 柱  |    | 2    |
| 2-4  | 柱  |    | 3    |
| 2-5  | 柱  |    | 0    |



写真3-11 部材例

表面含水率について図 3-3 に示す。一定温度・湿度の雰囲気下で、木材の吸湿量と質量が等しい状態にある含平衡含水率，木材の平衡含水率は 15-16%と言われるが、今回の物件においてはほとんどの部材の表面含水率が 15%を下回る結果となった。木材の変形や腐朽の進行がしにくい状況下であったと考えられる。腐朽が進行していた 1-15 や、水回り付近の 1-11 部材については含水率が高かった。

図 3-4 に超音波伝播速度測定結果を示す。目視検査によって腐朽が見られた 1-15 は、伝播速度が低くなっている。表面含水率が低かった 1-6,1-16 (柱) についても超音波伝播速度は低かった。

図 3-5 に穿孔抵抗測定結果を示す。健全と判断された 1-1,1-16 (柱),2-5 であったが、2-5 のみ高い抵抗値を示した。腐朽の関係については確認されなかった。

図 3-6 に縦縦圧縮載荷試験結果を記す。腐朽の見られた 1-15 について、他の部材と比較すると強度は低くなっているものの、 $20\text{N/mm}^2$  であり一定以上の強度が確保されている。

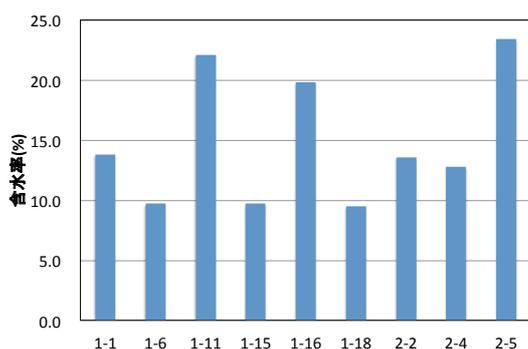


図 3-3 表面含水率測定結果

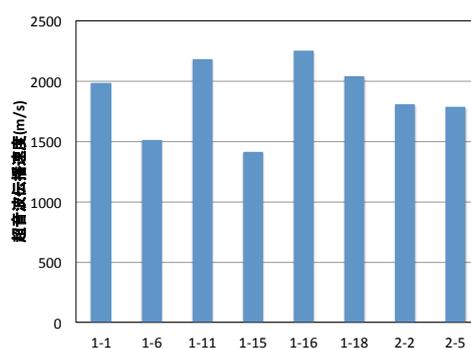


図 3-4 超音波試験結果

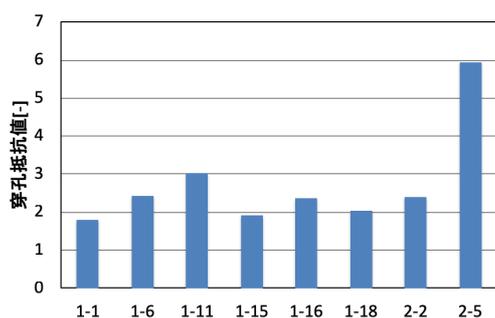


図 3-5 穿孔抵抗試験結果

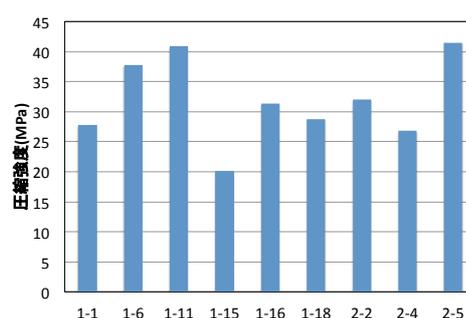


図 3-6 縦縦圧縮載荷試験結果

## B 岐阜公園三重塔

### B-1 物件情報

大正5年（1916年）、伊東忠太によって設計された岐阜県岐阜市岐阜公園内に所在する木造建築物である。2005年に登録有形文化財に登録された。高さ約22m、各層とも三間四方のつくりで、中央の心柱を鎖でつり上げて礎石から浮かせる「懸垂式」が用いられている。図3-7に岐阜三重塔の図面を、写真3-12に示す。東面に山を背負った立地となっている。今回の調査では、心柱、初重の四天柱、側柱について目視検査および超音波試験による強度推定を行った。

### B-2 実験結果

心柱、初重の四天柱、側柱について目視検査による一次診断を行い、劣化の進行が確認できる側柱、構造上大きな役割を担っている四天柱、心柱を対象に二次診断となる表面含水率、超音波伝播速度、穿孔抵抗試験を行った。また、今回の調査では温室度データロガーを用いて6月中旬からの2ヶ月間、温湿度環境の測定を行なった。調査部材の一部については縦圧縮試験を行なった。切り出した実験対象部材を温度20℃で室温管理された部屋で部材の質量変化がなくなるまで（1ヶ月程度）養生してから行なった。奈良文化財研究所による樹種同定結果（一部抜粋）を目視試験結果と併せて表3-5に示す。

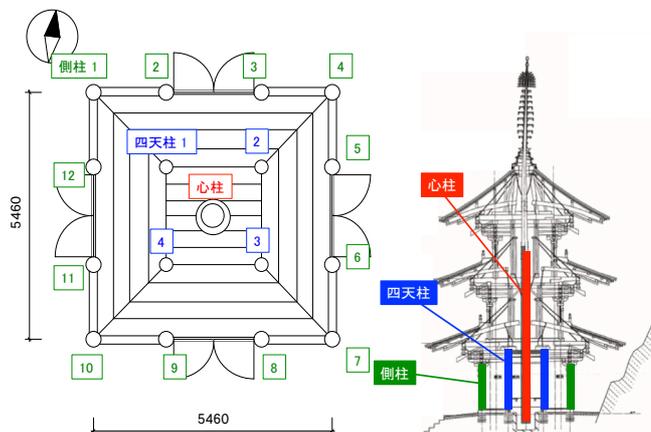


図3-7 平面および立面図

写真3-12 外観写真

表3-5 樹種同定結果と目視試験結果

| 部位  | 樹種  | 目視評価 |
|-----|-----|------|
| 心柱  | ヒノキ | 0    |
| 四天柱 | ヒノキ | 1    |
| 側柱  | 北   | 4    |
|     | 南   | 4    |
|     | 西   | 3    |

表 3-6 に温湿度の測定結果を示す。湿度の平均が 86.2～93.5 と相対湿度の高い環境であることがわかる。目視診断結果より、腐朽が進んでいたのは北側と南側の側柱の柱脚部（写真 3-13）であり、特に南側の側柱周辺の湿度は最低湿度でも 68.0%，平均湿度は 96.2%と高い値を示す結果となった。湿度が高い環境下にある部材は、腐朽菌やシロアリにとって好条件な環境であるため、腐朽が進行しやすい傾向がある。

図 3-9 に表面含水率の結果を示す。バラツキが大きく含水率と腐朽関係性は低い結果となった。

図 3-10 に超音波伝播速度試験結果，図 3-11 に穿孔抵抗試験結果を示す。非破壊検査の結果から北面，南面，西面の初重の側柱の腐朽が確認できた。北面の側柱に関しては目視により外観の劣化が確認できたが内部については健全性が保たれていることが確認できた。南面の側柱に関しては劣化が著しく，超音波試験や穿孔抵抗試験が実施できない箇所もあった。西面の側柱に関しては目視により外観の劣化が確認でき，内部腐朽も見られた。

表 3-6 各部位の相対湿度

|     | 心柱   | 四天柱 |      |    |    | 側柱   |      |      |      |
|-----|------|-----|------|----|----|------|------|------|------|
|     |      | 北東  | 南東   | 南西 | 北西 | 北3   | 南3   | 西2   | 西3   |
| 含水率 | 15.1 | -   | 23.2 | -  | -  | 16.5 | 24.3 | 44.1 | 38.5 |

単位:%



a) 北面側柱                      b) 南面側柱

写真 3-13 腐朽の様子

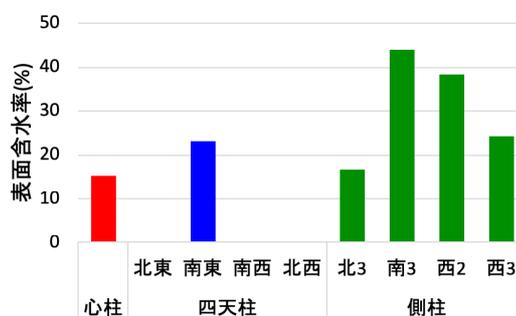


図 3-9 表面含水率測定結果

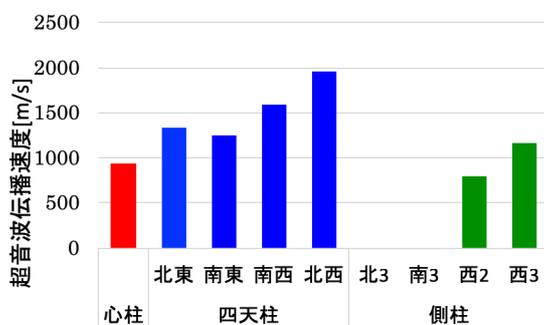


図 3-10 超音波伝播速度試験結果

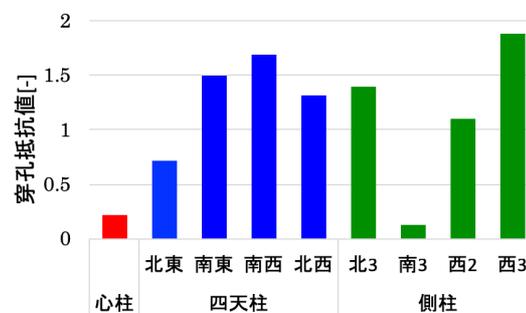


図 3-11 穿孔抵抗試験結果

## C O 邸 蔵

### C-1 物件情報

秋田県五城目町に所在する 1913 年に建てられた一般の住宅の蔵に使用されていた木材を対象に調査を行った。内部の躯体は木造で外壁に土壁を採用している。昭和 50 年代に改修・増築がなされている。今回は垂木として使用されていた部材に対して、一次診断として目視検査、二次診断として含水率測定、超音波試験、穿孔抵抗試験、引抜き抵抗試験を行った。写真 3-14 に外観、写真 3-15 に部材例を示す。なお、実験対象部材については、温度 20℃で室温管理された部屋で部材の質量変化がなくなるまで（1 ヶ月程度）養生後、各種実験を行なった。

### C-2 実験結果

表 3-7 に調査対象部材一覧及び目視調査結果を示す。A1-3 は竣工当時の部材であり、A4 のみ改修・増築の際に新しく取り付けられた部材である。

目視試験結果より、一部軽度に腐朽しているものはあったが、深刻な欠損等は確認できなかった。腐朽が進まなかった要因としては、外壁を土壁としていることから、室内の湿度が調湿され、腐朽菌の繁殖を防いだことが考えられる。



写真 3-14 外観写真



写真 3-15 部材例

表 3-7 部材一覧および目視調査結果

| 部材名 | 部材位置 | 樹種 | 年代      | 状態         | 目視評価 |
|-----|------|----|---------|------------|------|
| A-1 | 垂木   | マツ | 1913    | 健全         | 0    |
| A-2 |      |    |         | 釘の打ち込み痕    | 1    |
| A-3 |      |    |         | 全体的に軽度の腐朽跡 | 3    |
| A-4 |      |    | 1975~64 | 健全         | 0    |

表面含水率の測定結果を図 3-12 に示す。腐朽が確認された A-3 も含めてすべての部材で表面含水率は 15%を下回る値を示していた。腐朽が進行しにくい環境であると言えることになるが、腐朽は経年の結果として現れる現象であることに對し、含水率はその時々々の環境条件に左右されるため一時的な測定結果で評価することの難しさを表しているものと思われる。

超音波伝播速度について図 3-13 に示す。腐朽が確認された A-3 のみ極端に低い値を示した。図 3-14 に穿孔抵抗試験結果を示す。昭和 50 年代の改修時に使用開始された材のみが高い値を示した。目視や縦圧縮試験での結果と比較すると、他の試験結果とは相関性の低い結果となった。

図 3-15 に引抜き抵抗試験結果を示す。マツの公称値と比較すると、すべての部材で公称値には満たしていないものの、一定の強度を満たしていた。図 3-16 に示す縦縦圧縮荷試験結果においても引抜き抵抗試験と同等の結果であった。

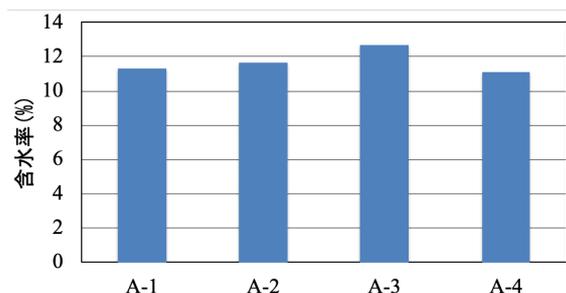


図 3-12 含水率測定結果

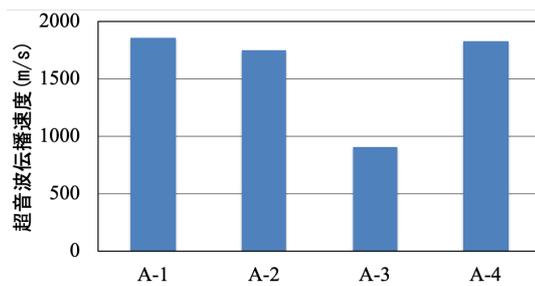


図 3-13 超音波伝播速度結果

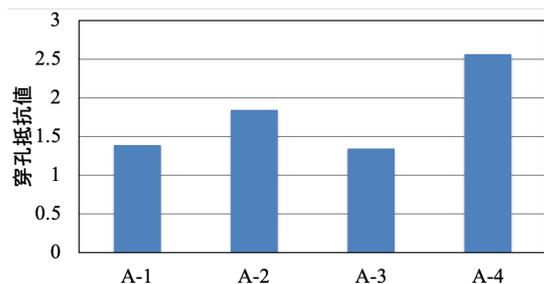


図 3-14 穿孔抵抗試験結果

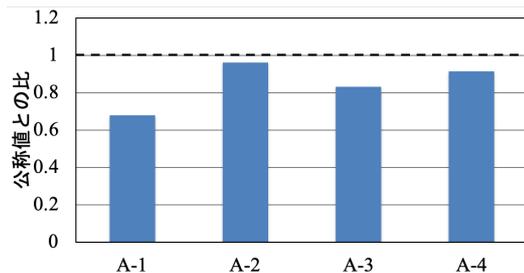


図 3-15 推定密度と公称密度の比

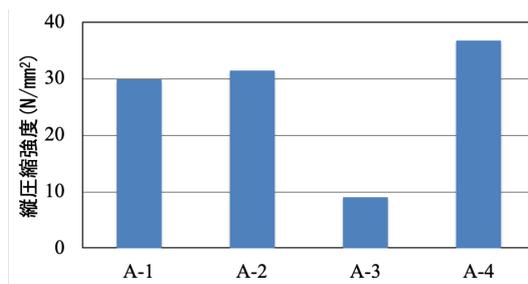


図 3-16 縦圧縮強度結果

## D 雲龍山 勝興寺

### D-1 物件情報

富山県高岡市にある勝興寺で使われた木材に対して調査を行った。勝興寺は1471年(文明3年)に営われた土山坊を起源としており、現在の地には1584年に建てられた。江戸時代中期から後期にかけて建立された12棟の建造物が現存しており、重要文化財として指定されている。配置図を図3-17、外観を写真3-16に示す。平成16年度に第Ⅰ期事業として本堂の修理が完工し、現在は第Ⅱ期修復事業として11棟の工事が進行している。現在行われている第Ⅱ期修復事業にて不要となった取り替え対象部材に対して、診断及び試験を行った。一次診断として目視検査、二次診断として含水率測定、超音波伝搬試験、穿孔抵抗試験、引抜き試験、三次診断として縦圧縮試験を行った。なお、切り出し後に引き取った実験対象部材については、温度20℃で室温管理された部屋で部材の質量変化がなくなるまで(1ヶ月程度)養生後、各種実験を行なった。

表3-8に対象部材一覧及び目視検査結果を示す。全体的に腐朽や蟻害による激しい劣化が確認された。部材1は空隙が多く内部劣化が推察できるものや、色褪せたように白く変色している部材も多数確認された。

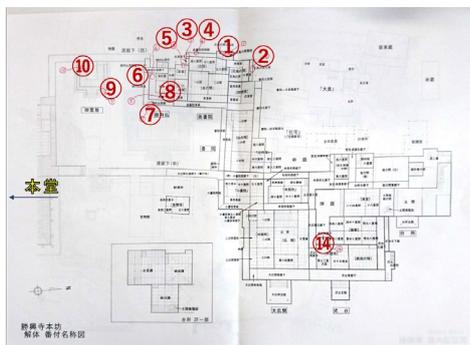


図3-17 配置図

写真3-16 外観写真

表3-8 部材一覧および目視調査結果

| 部材名 | 部材位置  | 建物名 | 樹種   | 年代      | 状態          | 目視評価      |
|-----|-------|-----|------|---------|-------------|-----------|
| 1   | 小屋束   | 奥書院 | マツ   | 1671    | 空隙が多く、非常に軽い | 4         |
| 2-1 | 野垂木   |     |      | 1671    | 大きな蟻害痕、白く変色 | 4         |
| 2-2 |       |     |      | 昭和初期    | 大きな蟻害痕      | 4         |
| 3-1 | 足固め   |     | アスナロ | 1671    | 健全          | 4         |
| 3-2 |       |     | 1688 | 健全      | 4           |           |
| 5   | 一重梁   |     | マツ   | 1688    | 健全          | 4         |
| 6   | 桔木飼物  | 御内仏 | アテ   | 1812    | 釘の貫入痕       | 0         |
| 8-1 | 化粧垂木受 |     |      | 1812    | 健全          | 0         |
| 8-2 |       |     |      | 1812    | 釘の貫入痕       | 1         |
| 9-1 | 桔木先   | 御霊屋 | マツ   | 1812    | 健全          | 0         |
| 9-2 |       |     |      | 小さな無数の孔 | 3           |           |
| 10  | 桔木押さえ | 宝蔵  | スギ   | 1812    | 釘による割れ      | 0         |
| 11  | 桔木    |     |      | 1867    | 健全          | 4         |
| 12  | 桔木    |     |      | 2016    | 比較用ペンチマーク材  | 0         |
| 14  | 柱     |     |      | 式台      | 1691        | 色あせたような白色 |

## D-2 実験結果

図 3-18 に表面含水率の試験結果を示す。一体を除いて表面含水率は 15%を下回り、環境面においては木材に劣化を及ぼす要因は少なかったと考えられる。

超音波伝播速度について図 3-19 に示す。目視によって劣化が判断された部材の多くは超音波伝播速度も低くなる傾向が見られた。比較用のベンチマーク材としたリファレンス部材 12 については、非常に高い数値となり 3000m/s を上回る結果となった。しかし、8-1,9-1 などの目視判定では健全性が高いと判断された部材でも超音波伝播速度は低い結果となった。

図 3-20 に穿孔抵抗試験結果を示す。超音波伝播速度とは異なる傾向となった。リファレンス部材 12 について、穿孔抵抗は虫害材よりも低い結果となった。図 3-21 に引抜き抵抗試験結果を示す。様々な樹種の材があるので、それぞれの実験結果による推定密度を、樹種の公称値で除した比で示している。多くの部材で大きく公称値を下回る結果となったものの、目視により健全性が高いと判断されたものは高い比を示した。また、図 3-18 から図 3-21 において部材の使用開始年代についても検討を行なったが、各試験結果において使用開始年数との関係性は見出せなかった。

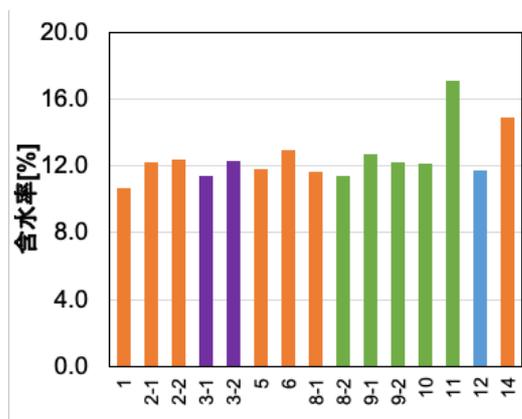


図 3-18 表面含水率試験結果

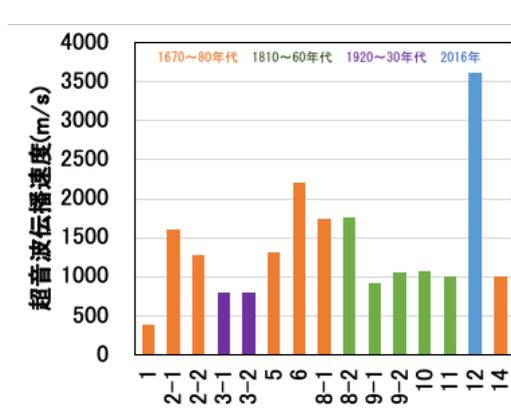


図 3-19 超音波試験結果

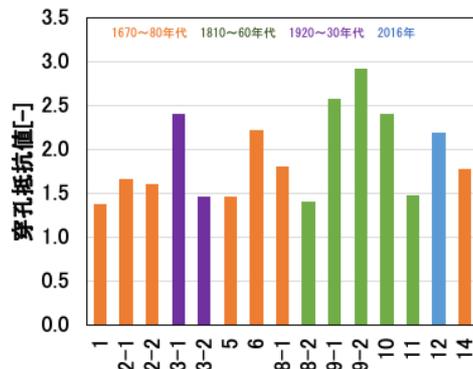


図 3-20 穿孔抵抗試験結果

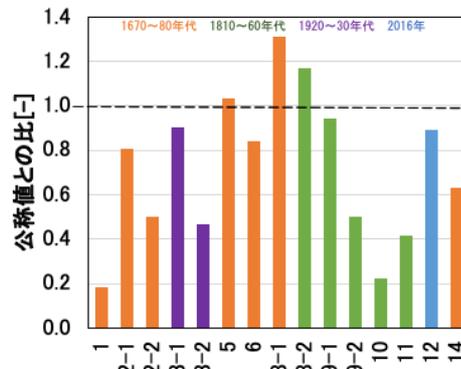


図 3-21 推定密度と公称密度の比

図 3-22 に縦圧縮強度結果を示す。リファレンス部材 12 と比較するとすべての部材が耐力低下していることが確認できる。特に部材 1 や部材 14 については縦圧縮強度が  $10\text{N/mm}^2$  未満となり、著しい劣化が確認された。部材 2-2 や 3-1 については、目視診断では劣化と判断されたが、一部健全性が保たれていることがわかった。

図 3-23 に実密度とプローブによる推定密度の比較、図 3-24 に実密度と縦圧縮強度の比較結果を示す。実密度と推定密度の相関は高く、また、今回の縦圧縮試験結果と実密度を比較した際にも一定以上の相関が確認できたことから、目視上劣化が進行しても所定の強度を保有する部材においては、推定密度による縦圧縮強度の推定が可能であるとと言える。

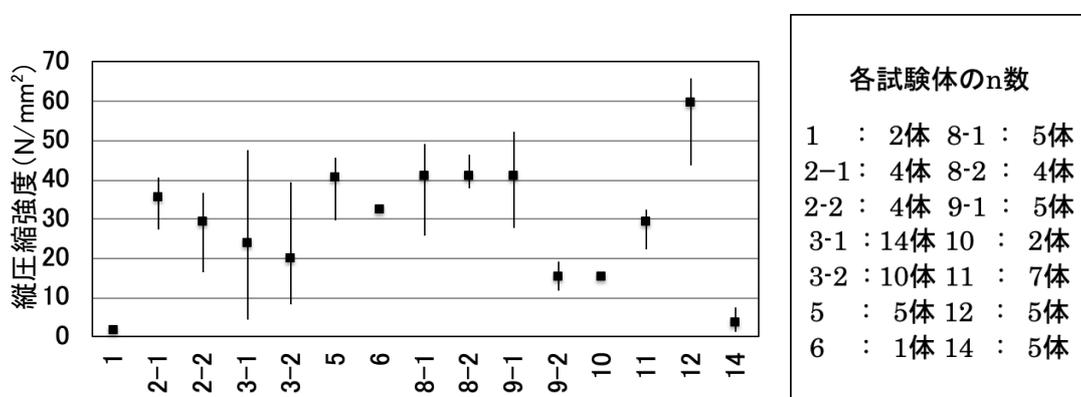


図 3-22 縦圧縮強度試験結果 [3-8]より図を引用

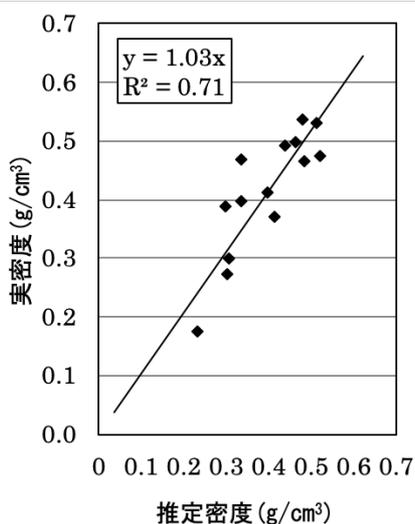


図 3-23 実密度と推定密度の比較 [3-8]より図を引用

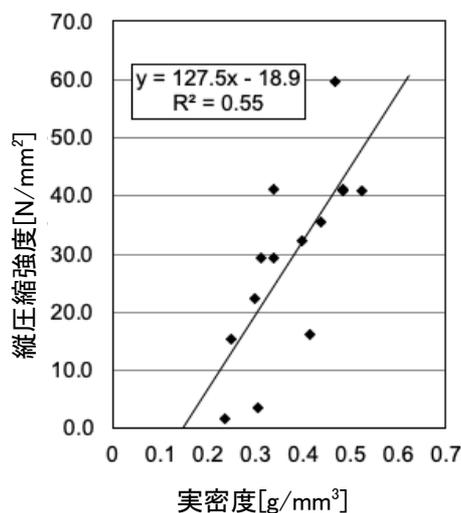


図 3-24 実密度と圧縮強度の比較 [3-8]より図を引用

## E 日光東照宮 上社務所

### E-1 物件情報

日光東照宮は、元和 3 年（1617）に建てられた家康公を御祭神におまつりした神社である。その翌年に「東照社」として正還宮された社で家康公を神として祀る社務所として上社務所は創立された。各社殿は 1636 年の「寛永の替」を始め、江戸幕府の管理下のもと幕末まで維持されてきた。寛永の造営以来、元禄、寛延、宝暦、安永、寛政、文化、天保、文久の各時代に修理が行われ、幕府の管理を離れた後も明治 36～39 年、大正 2～5 年、昭和 24 年に修理工事が行われてきた記録が存在する<sup>[3-6]</sup>。上社務所外観を写真 3-17 に、部材の一部を写真 3-18 に示す。

本調査においては、現在行われている修理に伴い、不要となった端材に対して一次診断として目視検査、二次診断として超音波試験、穿孔抵抗試験、引抜き抵抗試験、三次診断として縦圧縮試験を行った。なお、切り出し後に引き取った実験対象部材については、温度 20℃で室温管理された部屋で部材の質量変化がなくなるまで（1 ヶ月程度）養生してから各種実験を行なった。

### E-2 実験結果

表 3-9 に診断対象部材一覧及び目視調査結果を示す。調査対象として、取替対象の上社務所の束や貫を譲り受けたものである。部材はすべてヒノキ材で、漆塗りが施されていた。上社務所は、近年では昭和 50 年に修理工事を経験しているが、今回の部材がどの時期の部材であるかは明らかになっていない。

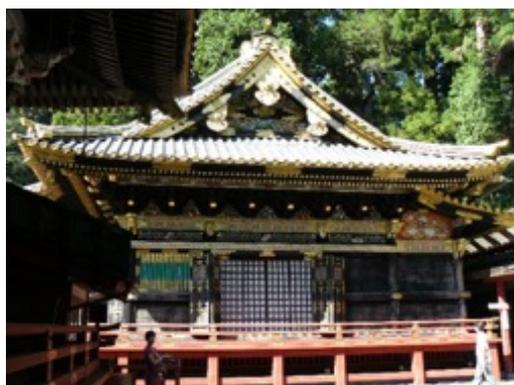


写真 3-17 外観写真



写真 3-18 部材例

表 3-9 部材一覧および目視調査結果

| 部材名   | 部材位置 | 樹種  | 年代 | 状態        | 目視評価 |
|-------|------|-----|----|-----------|------|
| N-1   | 束    | ヒノキ | 不明 | 健全        | 0    |
| N-2-1 | 貫    |     |    | 全体的に腐朽    | 4    |
| N-2-2 |      |     |    | 全体的に軽度の腐朽 | 3    |
| N-2-3 | 地覆   |     |    | 健全        | 0    |
| N-2-4 |      |     |    | 全体的に軽度の腐朽 | 3    |

図 3-25 に超音波伝播速度を示す。やや低めの傾向であったものの、著しく速度が遅いものではなく、目視試験において劣化を確認した N-2-2, N-3-2 材においても、超音波伝播速度は高い値を示した。

図 3-26 に穿孔抵抗試験結果を示す。多くの部材は高い穿孔抵抗値を示したが、目視により劣化を確認できた N-2-2 部材においては抵抗値が低い値を示した。

図 3-27 に引抜き抵抗試験結果を示す。ヒノキの公称値と比較すると、目視によって劣化の確認ができた N-2-2 および N-3-2 の試験体における推定密度が低い結果となった。一方で試験原理が似通った穿孔抵抗とは、異なる傾向が見られた。

図 3-28 に縦圧縮強度結果を記す。全体的に高い強度を示し、またヒノキ材の基準強度  $35.0\text{N/mm}^2$  と比較しても多くの部材がそれを満たし、概ね耐久性を保持していることが確認できた。

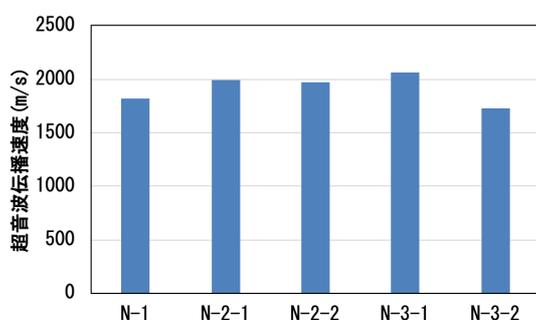


図 3-25 超音波試験結果

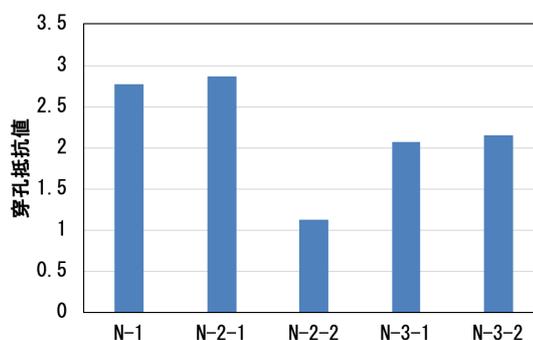


図 3-26 穿孔抵抗試験結果

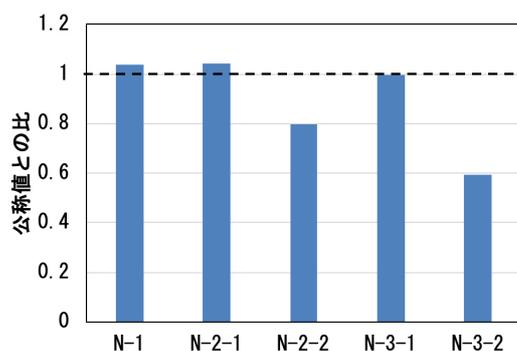


図 3-27 推定密度と公称密度の比

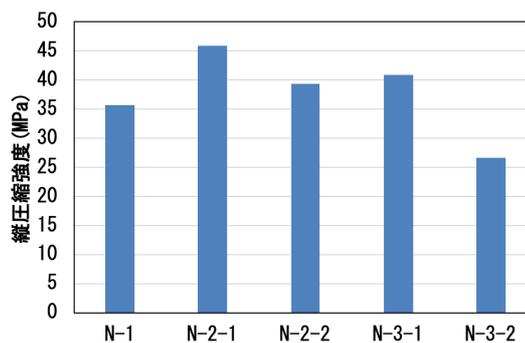


図 3-28 縦圧縮強度結果

## F 円覚寺正統院 開山堂

### F-1 物件情報

公安5年（1282年）、北条時宗が宗より招いた無学祖元禅師により円覚寺は開山された。円覚寺は創建以来、北条氏をはじめ朝廷や幕府からの帰依を受け、寺領の寄進などにより経済的基盤を整え、鎌倉時代末期には伽羅が整備された。室町時代から江戸時代にかけて何度か火災に遭い、衰微したこともあったが、江戸時代末期（天明年間）に大用国師が僧堂・山門寺の伽羅を復興され、宗風の刷新を図り今日の円覚寺の基礎が築かれた<sup>[3-7]</sup>。図3-29に立面図を、写真3-19に外観を示す。

今回の調査においては、平成27年に実施された破損調査を基に行われた改修工事に伴い、取り替え対象となった端材に対して診断及び試験を行った。一次診断として目視検査、二次診断として超音波試験、穿孔抵抗試験、引抜き抵抗試験、三次診断として縦圧縮裁荷試験を行った。なお、切り出し後に引き取った実験対象部材については、温度20℃で室温管理された部屋で部材の質量変化がなくなるまで（1ヶ月程度）養生してから各種実験を行なった。

### F-2 実験結果

表3-10に部材一覧および目視調査結果を示す。改修工事に伴い取り替え対象となった束材、根継柱材について診断及び試験を行った。樹種はケヤキである。目視試験では、A、B部材については劣化を確認できなかった。C部材では目視にて劣化による欠損が確認された。

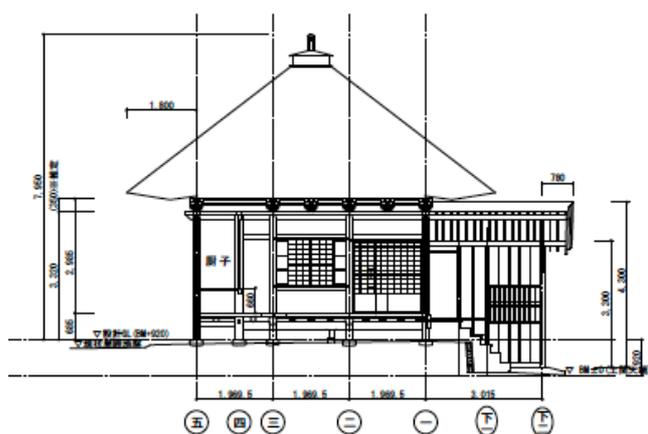


図3-29 配置図



写真3-19 外観写真

表3-10 部材一覧および目視調査結果

| 部材名 | 部材位置 | 樹種  | 年代   | 状態        | 目視評価 |
|-----|------|-----|------|-----------|------|
| A   | 束    | ケヤキ | 1685 | 健全        | 0    |
| B   |      |     |      | 全体的に腐朽    | 4    |
| C   |      |     |      | 全体的に軽度の腐朽 | 3    |
|     | 根継柱  |     |      |           |      |

超音波伝播速度について図 3-30 に示す。部材 A, B は目視での劣化は確認できず超音波伝播速度も大きな値を示した。部材 C については、劣化の進行が著しかったため、超音波伝播速度の測定ができなかった。

図 3-31 に穿孔抵抗試験結果による推定密度と公称密度の比を示す。すべての部材で高い穿孔抵抗値を示した。目視にて劣化確認できた部材 C については、著しく劣化した箇所を除くと、十分な抵抗値を示しており、欠損部のみの取り替えなどで長期的に使用できると考える。

図 3-32 に引抜き抵抗試験結果を示す。ケヤキの公称値と比較すると、すべての試験体において大きく公称値を下回った。測定値の平均は  $0.38\text{g/cm}^3$  と一定の密度は保有しているものの、ケヤキの公称値は  $0.69\text{g/cm}^3$  であるため、差が著しく開いた結果となった。

縦圧縮強度結果を図 3-33 に示す。C 部材については、劣化部分の試験体切り出しができず、部材内の健全な部分から小試験体を作成した。その影響で強度が高く出ているため、参考値とする。部材 A, B については基準強度  $21.6\text{N/mm}^2$  を十分に満たしており、健全性を保っていることが示された。

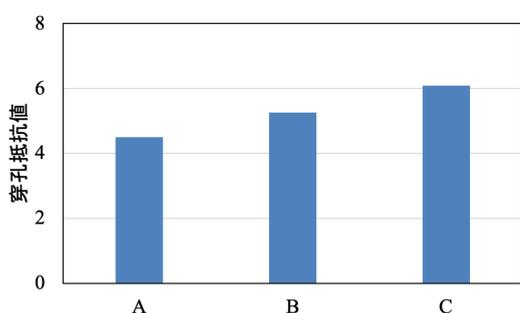


図 3-30 超音波試験結果

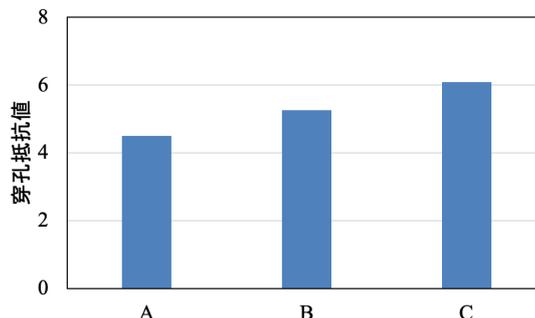


図 3-31 穿孔抵抗試験結果

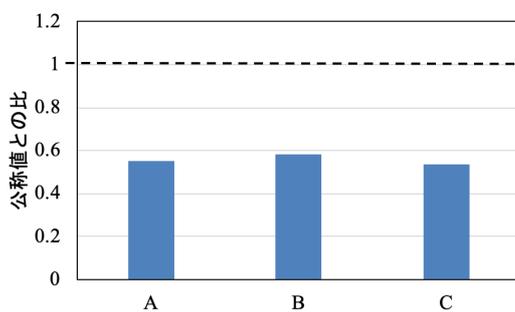


図 3-32 推定密度と公称密度の比

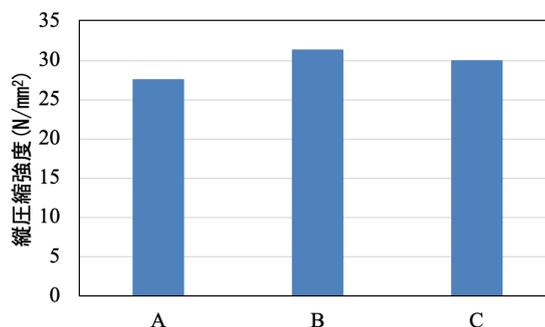


図 3-33 縦圧縮強度結果

## G 同潤会 荏原中延住宅

### G-1 物件情報

1924年、関東大震災後の住宅不足に対処し建設された低層木造住宅群の一つである。品川区西部に位置し、4戸を1棟として長屋を合計89棟建てたものである。本研究においては、建て替えに伴い取り替え対象となった部材を譲り受け、実験を行うものである。図3-34に配置図、写真3-20に外観、写真3-21に部材例を示す。一次診断として目視検査、二次診断として超音波試験、穿孔抵抗試験、引抜き抵抗試験、三次診断として縦圧縮裁荷試験を行った。なお、切り出し後に引き取った実験対象部材については、温度20℃で室温管理された部屋で部材の質量変化がなくなるまで(1ヶ月程度)養生してから各種実験を行なった。

### G-2 実験結果

表3-11に部材一覧および目視調査結果を示す。対象部材については増築前(Original)と増築後(New)の2種類の部材を対象に実験を行った。材種はマツ、使用開始時期は増築前のものについては1924年代周辺、増築後のものについては不明であった。蟻害や腐朽菌による劣化はほとんど確認されなかったが、ほぞ穴や釘痕が多くあり、表面の劣化が見られたため、目視評価は1とした。



図 3-34 配置図



写真 3-20 外観写真



写真 3-21 部材例

表 3-11 部材一覧および目視調査結果

| 試験体 |                 | 部材位置 | 樹種 | 年代   | 目視評価 |
|-----|-----------------|------|----|------|------|
| 状態  | 部材名             |      |    |      |      |
| 増築前 | Original-Top    | 柱    | マツ | 1685 | 1    |
|     | Original-Middle |      |    |      | 1    |
|     | Original-Bottom |      |    |      | 1    |
| 増築後 | New-Top         |      |    | 不明   | 1    |
|     | New-Middle      |      |    |      | 1    |
|     | New-Bottom      |      |    |      | 1    |

超音波伝播速度について図 3-35 に示す。こちらの部材においては、半径方向、接線方向の 2 種類の方向より超音波測定を行なった。図に示すように、Original 部材が New 部材より高い値を示した。

図 3-36 に穿孔抵抗試験結果を示す。超音波伝播速度とは反対の傾向を示し、New 部材が Original 部材より高い値を示した。

図 3-37 に引抜き抵抗試験結果を示す。マツの公称値と比較すると、全体的に満たしていないが 8 割程度の密度の状態を保っていることがわかった。

図 3-38 に縦圧縮強度試験結果を記す。マツ材の基準強度  $27.0\text{N/mm}^2$  と比較しても、十分な強度を保持していることが確認できた。

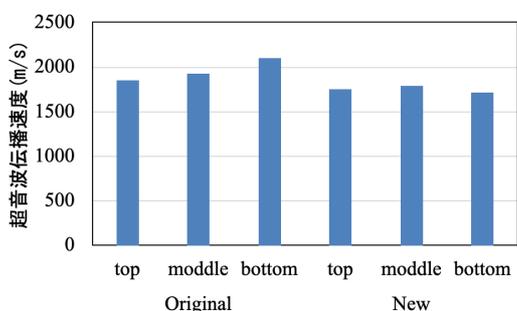


図 3-35 超音波試験結果

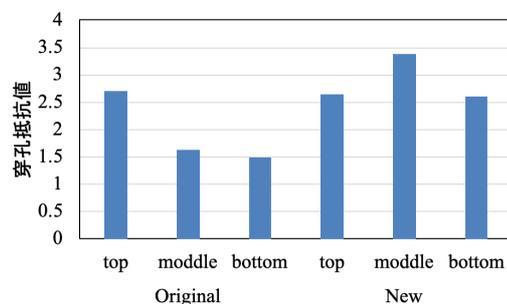


図 3-36 穿孔抵抗試験結果

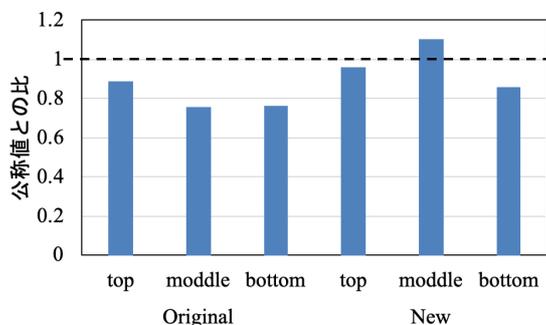


図 3-37 推定密度と公称密度の比

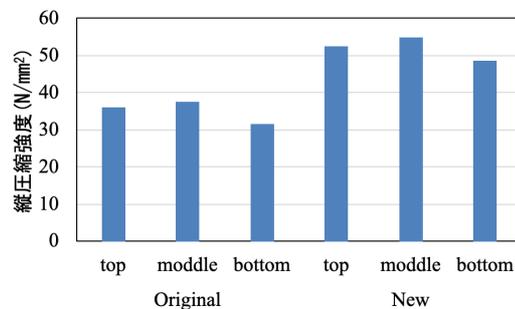


図 3-38 縦圧縮強度結果

### 3.4 実験結果の比較と考察

#### 3.4.1 材料特性の評価に対する検討方法

本項目においては、調査結果を基に、既存木造建造物における非・微破壊試験による測定値と木材物性値の関係を求め、非・微破壊検査による木材物性値の提案を行う。本検討においては強度と密度に着目し、超音波法、穿孔抵抗法、引抜き抵抗法のそれぞれの測定値と比較検討を行なった。

#### 3.4.2 縦圧縮試験結果

表 3-12 に強度試験体一覧，図 3-39 に縦圧縮試験結果を示す。スギ，マツ，ヒノキなど様々な樹種の部材について試験を行なった。実験結果より，全ての物件において，強度の平均は  $28\text{N/mm}^2$  以上と高い値を示した。

表 3-12 強度試験体一覧

| 物件         | 樹種   | 試験体数   |     |
|------------|------|--------|-----|
| T邸         | スギ   | 230    | 364 |
|            | ヒノキ  | 34     |     |
| 岐阜公園 三重塔   | 不明   | 30     |     |
| O邸 蔵       | マツ   | 20     |     |
| 龍雲山 勝興寺    | スギ   | 5      | 79  |
|            | マツ   | 39     |     |
|            | ヒバ   | 10     |     |
|            | アスナロ | 25     |     |
| 日光東照宮 上社務所 | ヒノキ  | 22     |     |
| 円覚寺正統院 開山堂 | ケヤキ  | 22     |     |
| 同潤会 荏原中延住宅 | マツ   | 33     |     |
|            |      | 合計：481 |     |

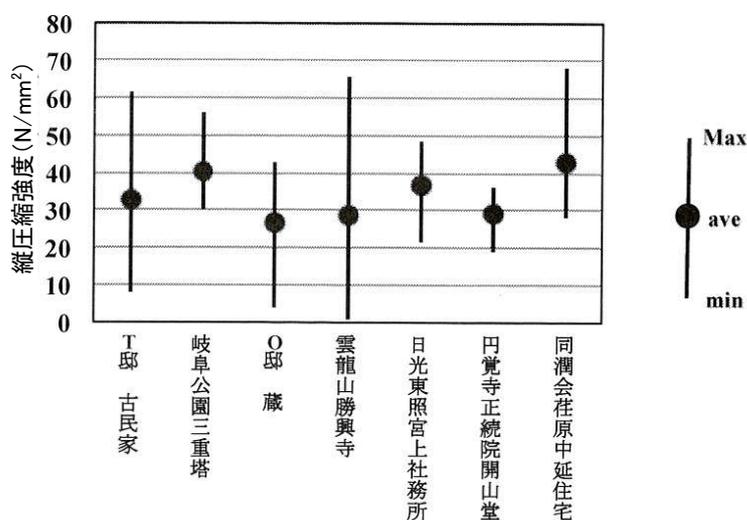


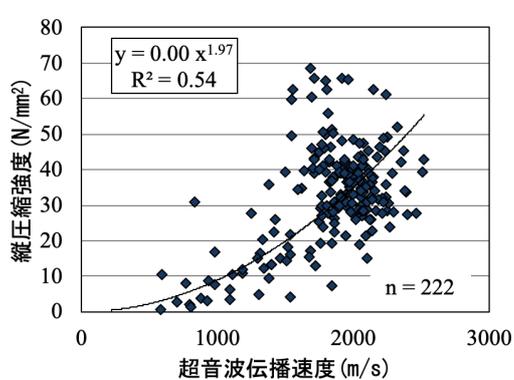
図 3-39 縦圧縮試験結果 [3-9]より図を引用・加工

### 3.4.3 縦圧縮強度と超音波伝播速度の関係

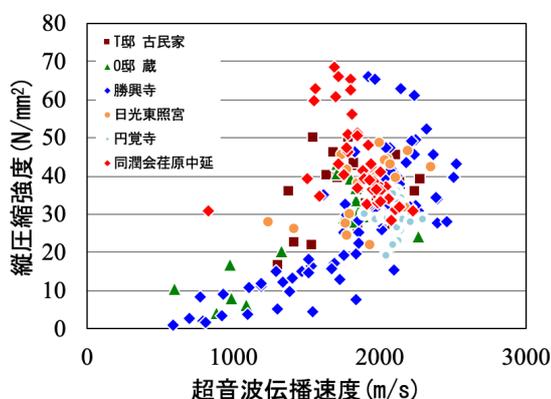
図 3-40 に縦圧縮強度と超音波伝播速度の関係を示す。図 3-40 (a) に示されるように、縦圧縮強度と超音波伝播速度の間には、 $R^2=0.54$  と、一定の相関が確認できた。

物件別(図 3-40 (b)) でのデータの偏りは見られなかった。樹種別 (図 3-40 (c)) では、スギ ( $R^2=0.40$ ) , マツ ( $R^2=0.52$ ) において一定の相関が見られた。

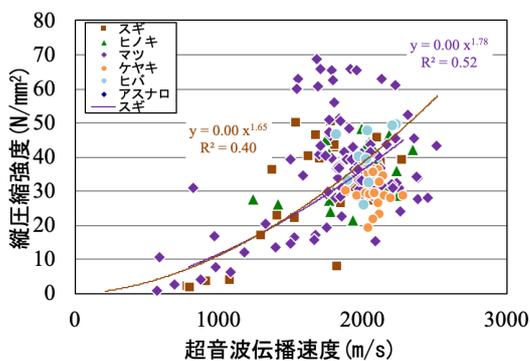
また、目視グレード別(図 3-40 (d)) では、グレード 0-2 の健全部材もしくはわずかに部材が腐朽している程度においては相関が見られないが、グレード 2-4 の明らかに劣化が確認できる範囲においては、 $R^2=0.51$  と一定の相関が確認できた。よって、一定以上劣化が進んだ低強度部材について、強度推定を行える可能性があると考えられる。



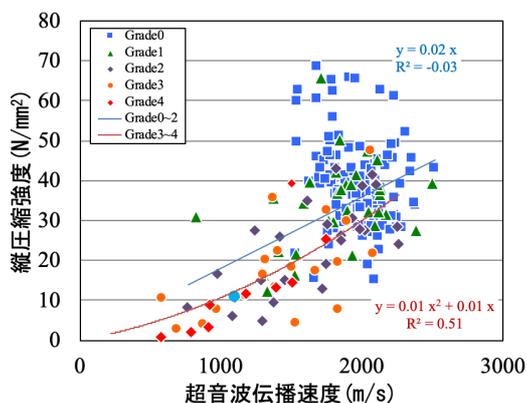
a) データ集合



b) 物件別



c) 樹種別



d) 目視グレード別

図 3-40 縦圧縮強度と超音波伝播速度<sup>[3-9]</sup>より図を引用・加工

### 3.4.4 縦圧縮強度と穿孔抵抗値の関係

図 3-41 に縦圧縮強度と穿孔抵抗値の関係を示す。強度と穿孔抵抗値の間には正の相関は確認できるが、 $R^2=0.05$  と相関性は極めて低い。そこで、要素に分けて検討を行った。

物件別 (図 3-41(b)) や樹種別 (図 3-41(c)) に検討したが、傾向は明らかにならなかった。一方、目視グレード別 (図 3-41(d)) においては、グレード 0-2 の健全部材もしくはわずかに部材が腐朽している程度においては  $R^2=0.48$  と一定の相関が確認でき、グレード 2-4 の明らかに劣化が確認できる範囲においては、 $R^2=0.04$  と相関は低い結果となった。これは超音波伝播速度とは逆の傾向を示している。腐朽の進行が著しい材に対しては、穿孔の際に抵抗を得ることができないため穿孔抵抗値を正確に得ることが難しいからであると考えられる。よって、本方法は一定以上の健全性を持つ部材に対しては有効な検討方法であると言える。

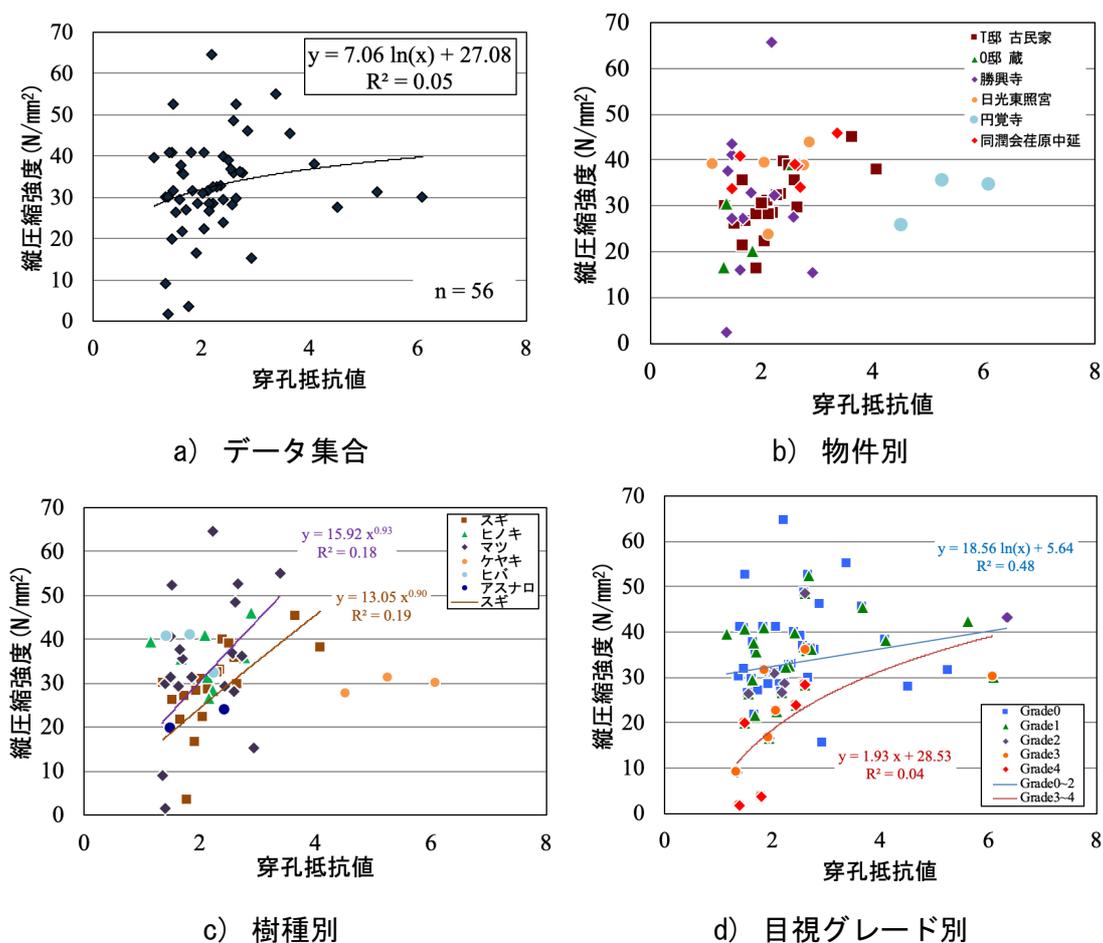


図 3-42 縦圧縮強度と穿孔抵抗の関係 [3-9]より図を引用・加工

### 3.4.5 推定密度と実密度との関係

実密度と圧縮強度の関係について、図 3-43 に示す。データ全体 (図 3-43(a)) では、強度と密度の間には正の相関は確認できるが、 $R^2=0.33$  と相関性は高くなかった。そこで、超音波試験及び穿孔抵抗試験と同様に、要素に分けて検討を行った。

目視グレード別 (図 3-43(b)) においては、グレード 0-2 の健全部材もしくはわずかに部材が腐朽している程度においては  $R^2=0.66$  と一定の相関が確認でき、グレード 2-4 の明らかに劣化が確認できる範囲においては、 $R^2=0.20$  ではあるものの一定の傾向を捉える結果となった。また、こちらの傾向は穿孔抵抗値と近似している。

そこで、プローブ引抜き試験を実施した 3 物件のデータをピックアップし、更に密度と圧縮強度の関係について検討を行った。図 3-44 に実密度と圧縮強度の関係、図 3-45 に引抜き抵抗試験による推定密度と縦圧縮強度の関係を示す。縦圧縮強度の結果が低い同潤会荏原住宅の相関は低かったが、一定以上の強度領域において、引抜き試験により概ね実密度を推定可能であるといえる。装置の構造上、補修・補強の判断が必要となる腐朽が進んだ低強度域の部材に対する判定が難しいことも明らかとなった。

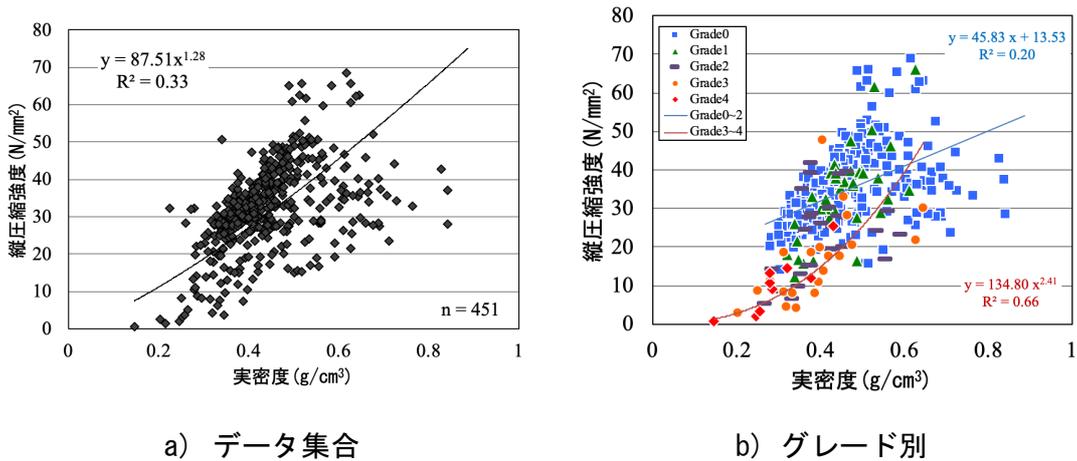


図 3-43 実密度と縦圧縮強度の関係 [3-9]より図を引用・加工

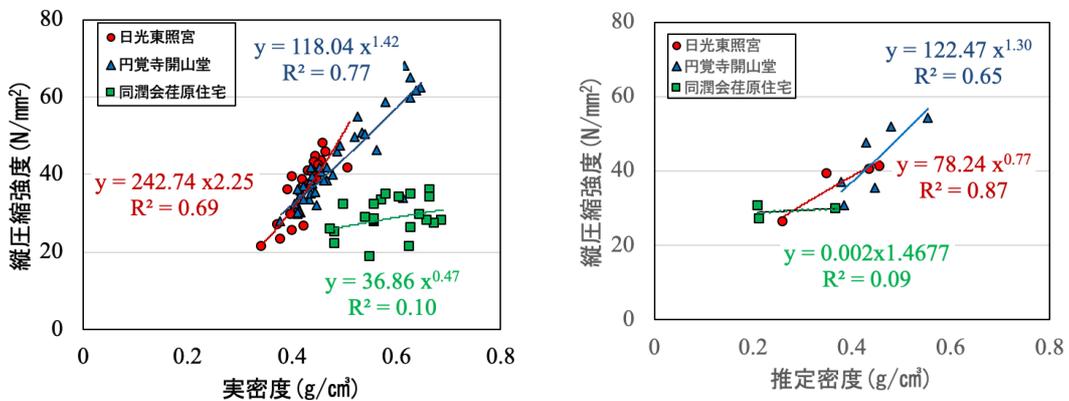


図 3-44 実密度と縦圧縮強度の関係

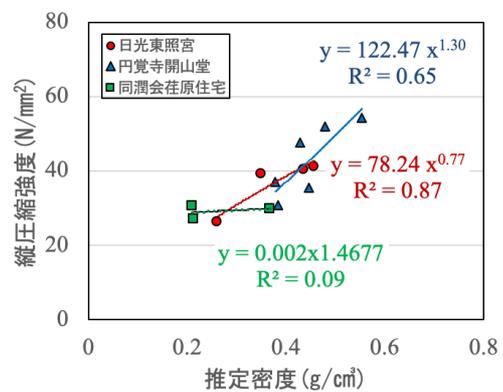


図 3-45 推定密度と縦圧縮強度の関係

### 3.5 低強度域における強度推定のための展望

補修や補強が必要となる部材は低強度域に位置することから、**図 3-40 d)**から目視グレード 3 とグレード 4 を抜き出したものが**図 3-46**である。なお、同図に示す近似曲線は各軸を対数変換して直線近似したものである。同図によると、グレード 3 とグレード 4 を併せて評価した場合の相関は  $R^2=0.59$  と一定の範囲内では相関が見られ、グレード 4 のみで評価した場合は  $R^2=0.89$  と相関が高い傾向にある。

ここで、**図 3-46(b)**より、低強度域をすぎの基準強度（圧縮） $21.6\text{N/mm}^2$ 、超音波伝播速度を  $1500\text{m/s}$  未満とし、 $1500\text{m/s}$  以上は中・高強度強度域と定義する。

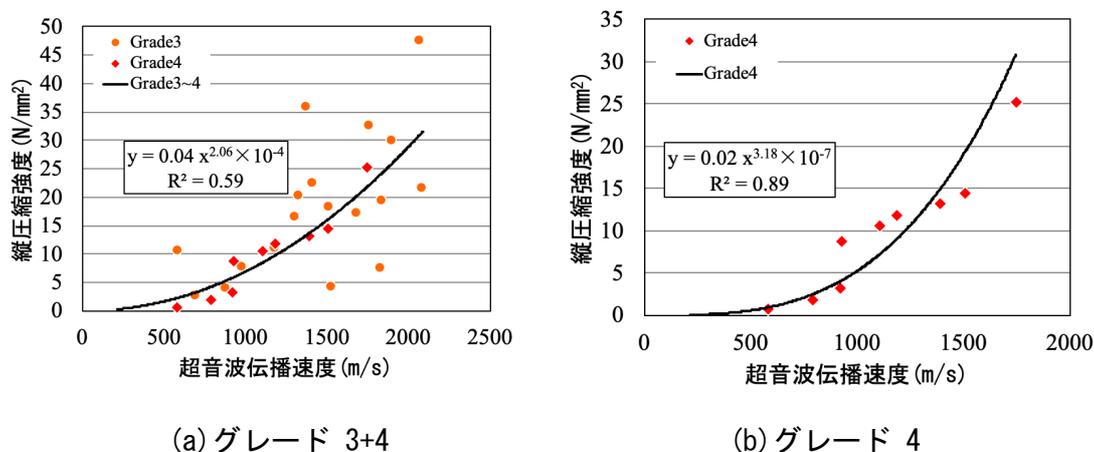


図 3-46 超音波伝播速度による強度推定

以上の傾向を踏まえて、グレード 4 の劣化木材を一例として低強度領域における超音波伝播速度に基づく縦圧縮強度推定式の検討を行った。

**図 3-47** に縦圧縮強度－無次元化超音波伝播速度関係を示す。同図の横軸に示す無次元化超音波伝播速度は、**式 3-1** に示すように超音波伝播速度測定値を本実験のグレード 4 における超音波伝播速度測定データ平均値  $1061\text{m/s}$  で除したものと定義する。

$$X = V_s / \bar{V}_s \quad \dots \text{式 3-1}$$

ここで、 $V_s$  : 超音波伝播速度測定値 (m/s)

$\bar{V}_s$  : 超音波伝播速度基準値 (=1061 m/s)

X : 無次元化超音波伝播速度

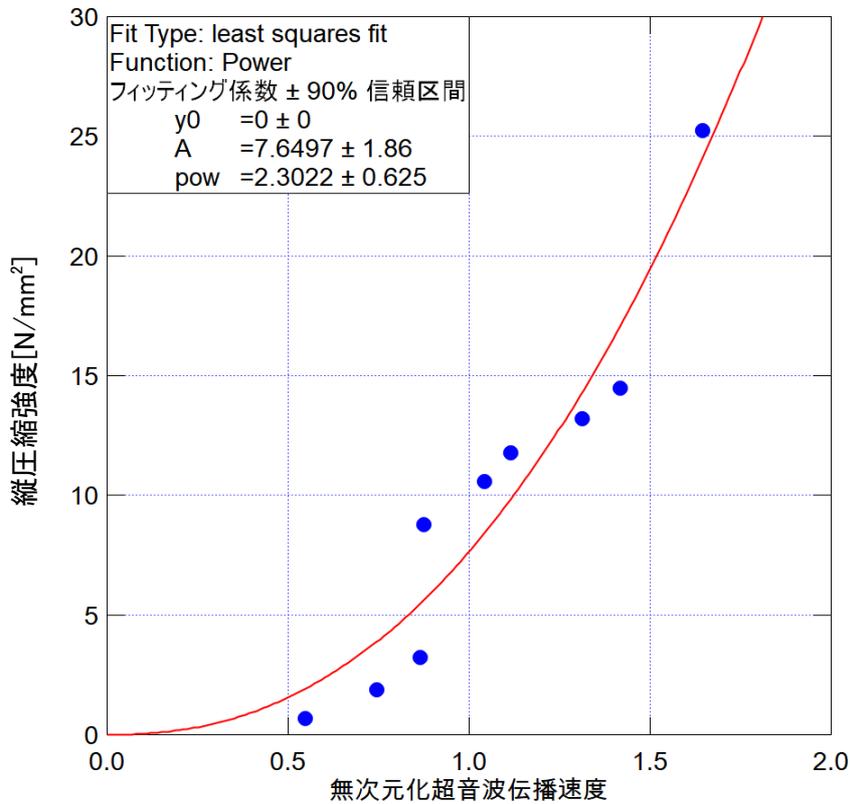


図 3-47 無次元化超音波伝播速度による強度推定

同図は図 3-46 (b) に対し、上記の定義に基づき横軸について無次元化を施したことになる。これに対し強度推定式を導出するために、式 3-2 に示す累乗近似式を仮定し最小二乗法による単回帰分析を実施し、各プロットに対する近似曲線を求めた。なお、近似曲線はゼロ点を通るものとし、同式では  $y_0 = 0$  と仮定し算定した。

$$y = y_0 + A \cdot x^{pow} \quad \dots \text{式 3-2}$$

単回帰分析の結果、 $A = 7.6497$ 、 $pow = 2.3022$ と求められた。以上の結果から、劣化木材の劣化グレード 4 に対する超音波伝播速度に基づく縦圧縮強度推定式を次式に提案する。

$$F_c = 7.65 \cdot X^{2.30} \quad \dots \text{式 3-3}$$

ここで、 $F_c$ : 劣化木材の縦圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

### 【第3章の参考文献】

- [3-1] 木材・木質構造の維持管理—劣化診断マニュアル—, 木材劣化診断士委員会, 公益社団法人日本木材保存協会, 2014.8
- [3-2] 雨宮昭二:浅川実験林苗畑の杭試験(1)杭の被害程度を評価する方法.林業試験場研究報告, Vol.150, pp.143-156, 1963.3
- [3-3] 山口修由ら:木ねじプローブの引抜き抵抗を用いた木質部材の健全性診断 曲げ強度に基づく既存木造建築物中の木質部材の健全性診断, 日本建築学会構造計論文集, 第73巻, 第626号, pp.607-615, 2008.4
- [3-4] 山口修由:既存木造建築物の木質部材の健全性診断(4)-プローブの引抜き抵抗を用いた現場診断法-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.393-394, 2014.9
- [3-5] 木材工業ハンドブック(改訂4版), (国)森林総合研究所, 2004.3
- [3-6] 日光東照宮公式ホームページ, <http://www.toshogu.jp>, アクセス日時: 2018.12.20 11:00
- [3-7] 円覚寺公式ホームページ, <http://www.engakuji.or.jp>, アクセス日時: 2018.12.20 15:00
- [3-8] 南川貴明他:重要文化財勝興寺江戸中期木部材の材料性能評価のための非/微破壊的手法の適用性に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 第87巻, pp.57-60, 2017.2
- [3-9] 南川貴明他:既存木造建造物の非/微破壊的強度推定手法に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 第88巻, pp.41-44, 2018.3



## 第4章

# 蟻害劣化した木造建築物の欠陥探査と 樹脂充填による補強方法



## 第4章 蟻害劣化した木造建築物の欠陥探査と樹脂充填による補強方法

### 4.1 はじめに

本章では、蟻害により内部劣化した木造部材を想定し、内部劣化に伴う断面欠損に対する定量的評価手法ならびに劣化材内部の樹脂充填による補強効果に対する非破壊的評価手法を提案することを目的とした基礎的な実験を実施した。本章はその詳細について述べるものである。

### 4.2 欠陥探査と樹脂充填による補強に対するアプローチ

第一段階（Step1）として、内部劣化を模擬した木材試験体を対象とした超音波による非破壊損傷評価と樹脂充填による補強効果の確認を行い、第二段階（Step2）として、実際に蟻害劣化を生じさせた木材試験体に対して提案の手法の適用性を検討した。

本研究の提案手法と、従来の劣化診断・補修方法との比較を表4-1に示す。Step1では蟻害による実際の欠損状況をドリルの穿孔により置換した模擬劣化試験体を用いた。この試験体に対し超音波伝播速度の測定による診断と縦圧縮載荷試験を行うとともに、樹脂充填による補強効果の超音波法による評価を行った。Step2においては、実際に蟻害を生じさせた試験体に対して、Step1と同様の検討を行うとともに、曲げ部材とほぞ接合部に対する補強効果を検討した。

表 4-1 劣化診断・補修方法

|      | 従来の方法   | 本研究における提案    |
|------|---------|--------------|
| 診断方法 | 目視      | 超音波法による非破壊調査 |
| 修復方法 | 改築・取り替え | 樹脂充填         |

## 4.3 超音波法と樹脂充填による補強法

### 4.3.1 超音波法

木部材の劣化診断は、目視や触診に加え、非破壊試験や微破壊試験が用いられている。本研究において対象としている内部劣化の調査ツールとしては、超音波や応力波の弾性波などを用いた診断機器の適用が考えられる。特に、第2章、第3章でも述べている超音波の伝播速度計測は、木材内部の超音波の伝播にかかった時間を計測することで内部の状態を相対的に評価する方法であり、特に今回取り上げる蟻害劣化のような内部劣化の診断に有効なツールであると考えられる。

蟻害劣化診断に関しては、文献<sup>[4-1]</sup>によると、第2章で紹介した超音波や応力波などの弾性波と曲げ性能との相関については、実部材に対する腐朽度と強度の関係<sup>[4-2]</sup>や、全面圧縮試験のように全体を計測できる場合の計測値と強度との相関は高いことが指摘されている<sup>[4-3]</sup>。

また、第3章にて述べた実建築物の劣化部材に対する調査データより、特に低強度域において超音波法は有効な手段であることが明らかとなった。

以上の背景をふまえ本研究においては、木材内部の欠陥探査に超音波法を用いることとした。超音波の伝播経路に欠陥・空隙・密度変化が存在すると超音波の減衰や伝播速度・伝播経路の変化が生じる。既往の研究<sup>[4-3]</sup>ではこの原理を用いて内部の劣化部位を通過する際の速度減少や迂回することによる伝播時間の変化を用いた探査方法が示されている。図4-1に超音波試験の透過法 (Section transmission) と表面法 (Surface transmission) の測定方法を示す。超音波伝播速度の測定方法として代表的なものは「透過法」「表面法」である。

透過法は、材軸直交方向の計測は内部劣化状況を相対的な判断に寄与し、表面法は接合部の内部劣化状況および充填状況の把握にも使用可能であると考え適用することとした。

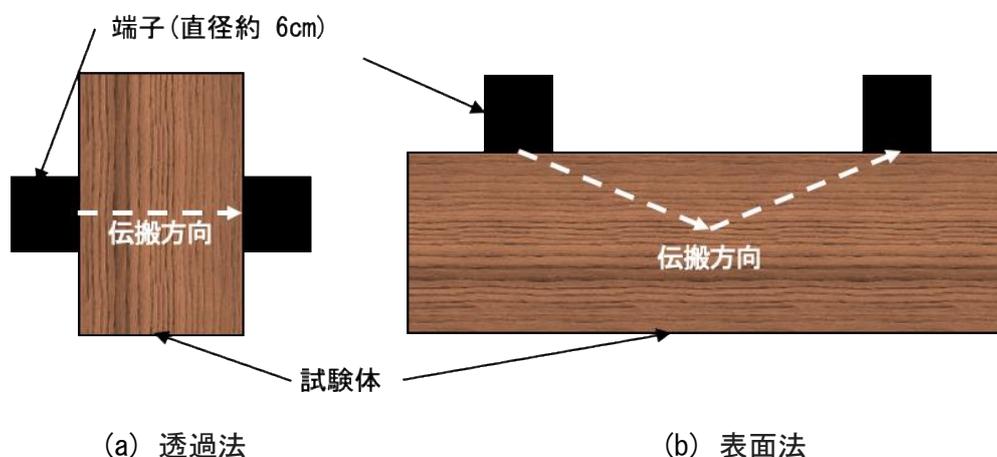


図4-1 超音波伝播速度の測定方法

### 4.3.2 充填樹脂の検討

充填材について、樹脂の種類と使用方法と使用頻度の収集を、文献<sup>[4-4]、[4-5]、[4-6]</sup>および公益財団法人文化財建造物保存技術協会データベース<sup>[4-7]</sup>で行った。調査結果を表 4-2 に示す。

表 4-2 においては、既往の研究<sup>[4-4]</sup>の分類方法を参考に、使用事例が 30 回以上の場合は◎、1～29 回の場合は○、使用例がなかった場合は—として表記した。使用された樹脂の種類ではエポキシ樹脂が最も多く、接着・充填・含浸と幅広く使用されている。次にアクリル樹脂、ウレタン樹脂となっている。充填・含浸による補強に着目するとエポキシ樹脂やウレタン樹脂が多く使用されている。

充填の用途では例えば樋口<sup>[4-8]</sup>による亀裂や虫穴など小さな部分の充填や、構造材の修復において新材と古材との空隙部への充填などが挙げられる。また、含浸では風食を受けた表層や虫害、腐朽により脆弱化した内部の強化を目的としたもの、および接着性向上を目的としたものの 2 種類に大別されていた<sup>[4-9]</sup>。

調査結果を参考に検討した結果、エポキシ樹脂にポリアミン樹脂を配合した 2 液混合硬化型樹脂、エポキシ樹脂とポリアミド樹脂を配合した 2 液混合硬化型樹脂、エポキシ樹脂とアラミド樹脂を配合した 2 液混合硬化型樹脂およびポリウレタン樹脂の 4 種類の樹脂を選定した。中心部をドリルにより円型穿孔した模擬劣化試験体各樹脂を注入し、圧縮試験及び超音波伝播試験を予備試験として実施した。

表 4-2 樹脂の種類と使用例

| 種類       | 接着 | 充填 | 含浸 |
|----------|----|----|----|
| エポキシ樹脂   | ◎  | ○  | ○  |
| ウレタン樹脂   | —  | ○  | ◎  |
| アクリル樹脂   | ○  | —  | ○  |
| 酢酸ビニル樹脂  | ◎  | ○  | —  |
| 尿素樹脂     | ◎  | —  | —  |
| ポリエステル樹脂 | —  | —  | ○  |

使用例：◎30 以上，○1-29，— 0（使用なし）

## 4.4 Step1 模擬劣化させた試験体による検討

### 4.4.1 予備実験

本実験では恒温室で 2 週間程度養生させた同一部材から試験体を切り出し試験体間の強度のばらつきを極力低減した上で、木材の劣化状況を再現するため、既往の研究<sup>[4-10]</sup>を参考に中心部にドリルにより円型穿孔させ作製した模擬劣化試験体（図 4-2）に対して、劣化とみなした穿孔部分に樹脂を充填し補強するとともに縦圧縮試験を行い、模擬劣化による強度低下と樹脂充填による補強効果を検討した。シロアリは辺材部分に孔を開け、年輪に沿って食害を進める傾向にあり、表面は辺材側が線状に連なって蟻道ができることが多いが、今回の実験においては補強孔をあけることによる木材の状態変化と樹脂の補強効果を検証するために、圧縮力を均等に負担できるように孔を中心および均等かつ分散配置となるよう穿孔することとした。また、穿孔する孔の方向は繊維方向とした。木材はスギを使用し、試験体寸法は 30×30×60mm とした。実験におけるパラメータは試験体の体積および載荷断面積に対する欠損の比率および樹脂充填の有無とした。

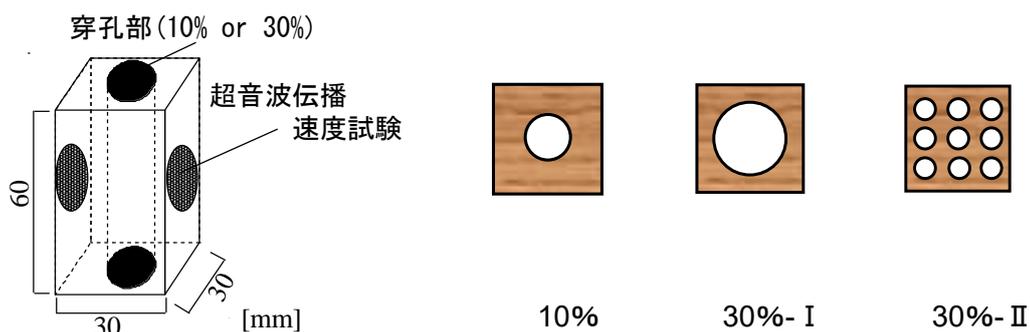


図 4-2 試験体概要図<sup>[4-11]</sup>より図を引用

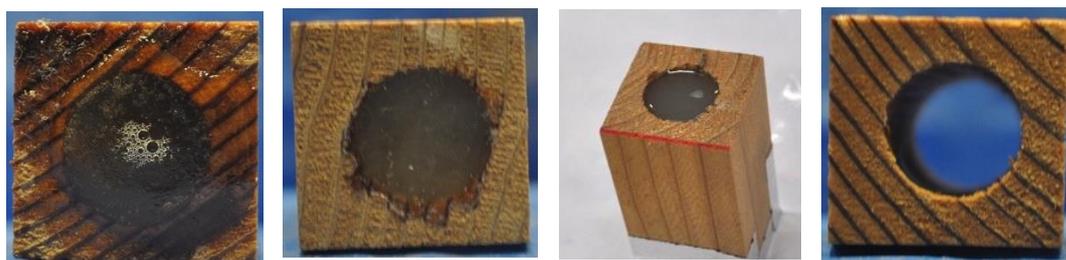
パラメータの詳細および施工方法を表 4-3 に示す。なお、体積欠損率および載荷断面欠損率は欠損割合をそれぞれ同一とし、以降欠損割合と呼ぶ。充填なし（記号 N を付記）、充填ありに対して、健全試験体を 0-N とし、欠損割合 10% (10-N)、欠損割合 30%-I（中心に一か所穿孔）、30%-II（分散穿孔）の 7 種類の試験体について、それぞれ 5 体、合計 35 体に対し実験を行った。欠損割合については、文献<sup>[4-1]</sup>よりわずかな断面欠損率でも強度は低下することが明らかとなっていることから、欠損割合 10%、30% とすることとし、それぞれ直径 10mm、18mm で一か所穿孔した（パターン I）。

超音波試験の透過法によって穿孔前後の速度変化から欠損の評価および樹脂充填前後の速度変化を評価した。また、圧縮載荷試験は 3 章の実験と同様に JIS Z 2101（木材の試験方法）に準じて行った。

4.3.2 の検討結果より、充填型のエポキシ樹脂を 3 種類と含浸型のポリウレタンを 1 種類の計 4 種類を用意した。表 4-3 に示すように、樹脂 A はエポキシ樹脂+ポリアミド樹脂の 2 液混合硬化型で文化財での使用例もあり市販されている。樹脂 B はエポキシ樹脂+ポリアミン樹脂の 2 液混合型であり、樹脂 A で使用しているポリアミド樹脂より反応速度が速い特徴がある。樹脂 C は圧縮に強いエポキシ樹脂と引張に強いアラミド繊維を使用している。樹脂 D は 1 液型のポリウレタン樹脂で文化財への使用例もあり経年による変色が少ない特徴がある。樹脂 B・C についてはスタティックミキサーという専用器具を使用し樹脂充填を行い、樹脂 D では全表面から含浸を施した。

表 4-3 模擬劣化試験体のパラメータ [4-11]より表を引用

| 試験体名    | 欠損割合 [%] | 穿孔パターン | 樹脂   |                |    |            | 試験体数 |
|---------|----------|--------|------|----------------|----|------------|------|
|         |          |        | 樹脂名  | 成分             | 方法 | 器具         |      |
| 0-N     | 0        | I      | None | -              | -  | -          | 5    |
| 10-N    | 10       | I      |      |                |    |            | 5    |
| 30-I-N  | 30       | I      |      |                |    |            | 5    |
| 30-II-N | 30       | II     |      |                |    |            | 5    |
| 10-A    | 10       | I      | A    | エポキシ樹脂+ポリアミド樹脂 | 充填 | -          | 5    |
| 30-I-A  | 30       | I      |      |                |    |            | 5    |
| 30-II-A | 30       | II     |      |                |    |            | 5    |
| 10-B    | 10       | I      | B    | エポキシ樹脂+ポリアミン樹脂 | 充填 | スタティックミキサー | 5    |
| 30-I-B  | 30       | I      |      |                |    |            | 5    |
| 30-II-B | 30       | II     |      |                |    |            | 5    |
| 10-C    | 10       | I      | C    | エポキシ樹脂+アラミド繊維  | 充填 | スタティックミキサー | 5    |
| 30-I-C  | 30       | I      |      |                |    |            | 5    |
| 30-II-C | 30       | II     |      |                |    |            | 5    |
| 10-D    | 10       | I      | D    | ポリウレタン樹脂       | 含浸 | -          | 5    |
| 30-I-D  | 30       | I      |      |                |    |            | 5    |
| 30-II-D | 30       | II     |      |                |    |            | 5    |



樹脂 A

樹脂 B

樹脂 C

樹脂 D

写真 4-3 充填・含浸後の試験体写真

縦圧縮強度試験結果一覧を図 4-3 に示す。欠損割合 10%では欠損の有無による強度変化はほとんど見られない。充填を行うことで欠損前と比較して 10-A では 10%、10-B では 20%、10-C では 5%の強度が向上した。含浸では強度がわずかに低下する結果となった。

欠損割合 30%-I では欠損によって強度が 30%以上低下したが、樹脂を充填することで強度が 1.8 倍まで向上したため補強効果が発現したとみられる。一方で含浸型の 30-I-D では強度の上昇はほとんど見られなかった。

欠損割合 30%-II でも同様に強度低下と充填による補強効果も確認されたものの 30-I-N と比べ 30-II-N での強度低下は小さかった。

10%・30%-I・30%-II の試験を通じて、樹脂 C と D では補強効果が低く樹脂 A と B では補強効果が高いことが確認できる。樹脂 A・B を比較すると樹脂 B が樹脂 A と比べてばらつきが小さいことがわかる。また、ポリアミン樹脂はポリアミド樹脂に比べ反応速度が遅く可使時間が長い。これらのことから、樹脂 B が最も適合していると考え、エポキシ樹脂+ポリアミン樹脂のものを蟻害試験への充填に採用することとした。

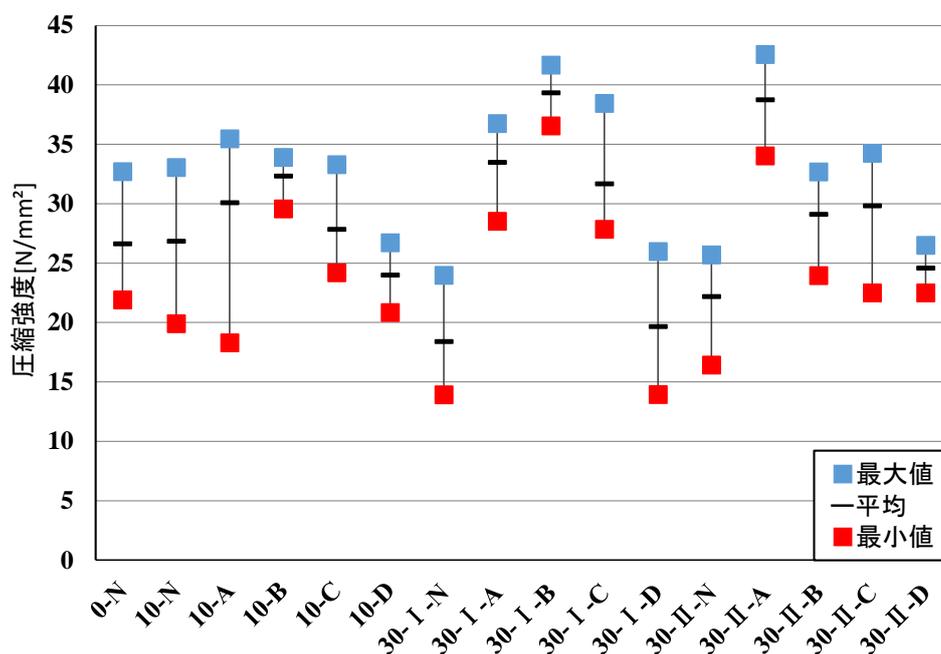


図 4-3 縦圧縮強度試験結果一覧<sup>[4-11]</sup>より図を引用・加工

#### 4.4.2 実験概要

4.4.1 の予備実験において決定した樹脂を用いることとし、充填なし(記号 N を付記)、充填あり(記号 R を付記)に対して、健全試験体を 0-N とし、欠損割合 10% (10-N)、欠損割合 30%- I (中心に一か所穿孔)、30%- II (分散穿孔) の 7 種類の試験体について、それぞれ 5 体、合計 35 体に対し実験を行った。実験のパラメータを表 4-4 に示す。実験方法については、4.4.1 節と同様の試験方法で行なった。

また、選定した樹脂について、樹脂単体の力学性能を把握するために縦圧縮載荷試験を行なった。試験体サイズは 20×20×40mm とし、5 体の試験体に対し、3 章で実験と同様に JIS Z 2101 (木材の試験方法) に準じて縦圧縮載荷試験を行なった。結果を表 4-5、圧縮前後の試験体の様子を図 4-4、圧縮載荷試験の様子を図 4-5 に示す。

表 4-4 模擬劣化試験体のパラメータ (本実験) [4-11]より表を引用

| 試験体名    | 欠損割合 [%] | 穿孔パターン | 樹脂   |                    |    |                | 試験対数 |
|---------|----------|--------|------|--------------------|----|----------------|------|
|         |          |        | 樹脂名  | 成分                 | 方法 | 器具             |      |
| 0-N     | 0        | I      | None | -                  | -  | -              | 5    |
| 10-N    | 10       | I      |      |                    |    |                | 5    |
| 30-I-N  | 30       | I      |      |                    |    |                | 5    |
| 30-II-N | 30       | II     |      |                    |    |                | 5    |
| 10-R    | 10       | I      | R    | エポキシ樹脂+<br>ポリアミン樹脂 | 充填 | スタティック<br>ミキサー | 5    |
| 30-I-R  | 30       | I      |      |                    |    |                | 5    |
| 30-II-R | 30       | II     |      |                    |    |                | 5    |

表 4-5 圧縮強度結果

| ポアソン比 | ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> ) |
|-------|----------------------------|
| 0.48  | 36.2                       |



a) 試験前      b) 試験後

図 4-4 試験体



図 4-5 圧縮載荷試験の様子

#### 4.4.3 模擬劣化試験体に対する縦圧縮载荷試験結果

図 4-6 に縦圧縮強度試験結果一覧を示す。充填なしの試験体において、欠損割合 10%では強度変化はみられず、欠損割合 30%-I では強度が 30%以上、30%-II では約 20%の減少がみられた。

樹脂充填による補強効果に関して、欠損割合 10%への充填を行った 10-R では 0-N（無欠損）とほぼ同等の強度となり、欠損割合 30%ではそれぞれの充填なしと比べ 30-I-R では 2 倍以上、30-II-R では 30%の強度上昇がみられた。また 10-R、30-I-R では樹脂の充填により木材強度のばらつきの低減に寄与する傾向が認められた。また、30-II-R での強度は欠損なしの標準試験体に近い値を示した。

以上により、穿孔により耐力の低下が生じている模擬劣化試験体に対して、樹脂充填により、欠損割合 30%では 30~200%の強度の向上を確認した。

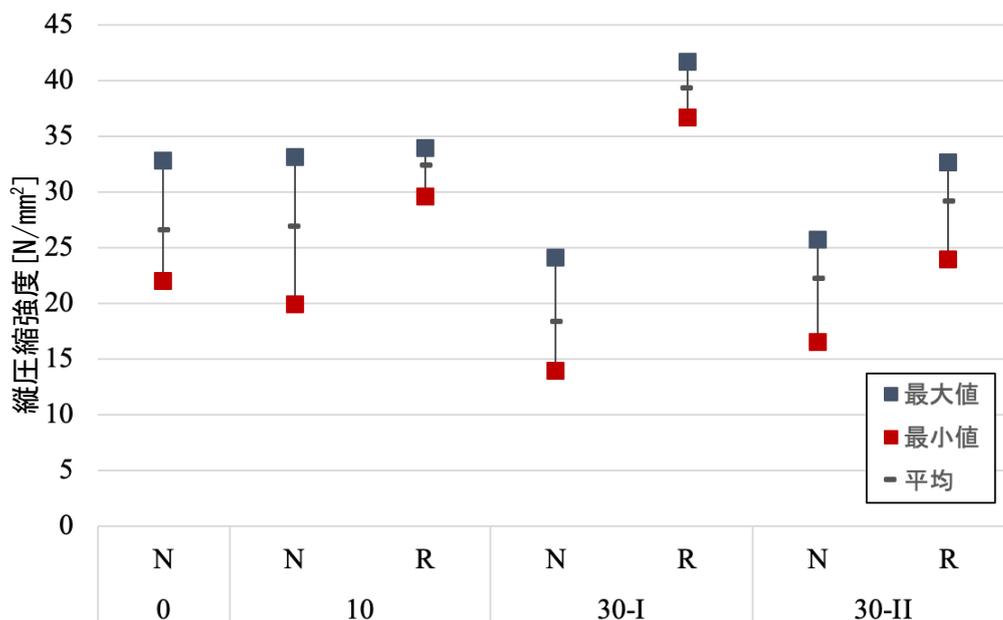


図 4-6 縦圧縮強度一覧<sup>[4-11]</sup>より図を加工

#### 4.4.4 模擬劣化試験体に対する劣化探査

穿孔後の超音波伝播速度を穿孔前の値で除した超音波伝播速度比を図 4-7 に示す。超音波伝播速度比は欠損割合 10%では平均 0.96, 欠損割合 30%においては, 30%-I では平均 0.85, 30%-II では 0.75 と小さくなることから, 超音波法によって探査を行なうと, 内部劣化に伴う欠損の傾向を定量的に捉えることが可能であることがわかる。前項の圧縮載荷試験において欠損割合 10%では強度低下はほとんど生じておらず, 超音波法において超音波伝播速度比にも変化の見られないことと概ね対応している。一方で, 強度低下が認められた欠損割合 30%において超音波伝播速度比も大きく低下している。

以上のことから, 超音波法によって強度低下を引き起こす欠損を探知することが可能であると考ええる。

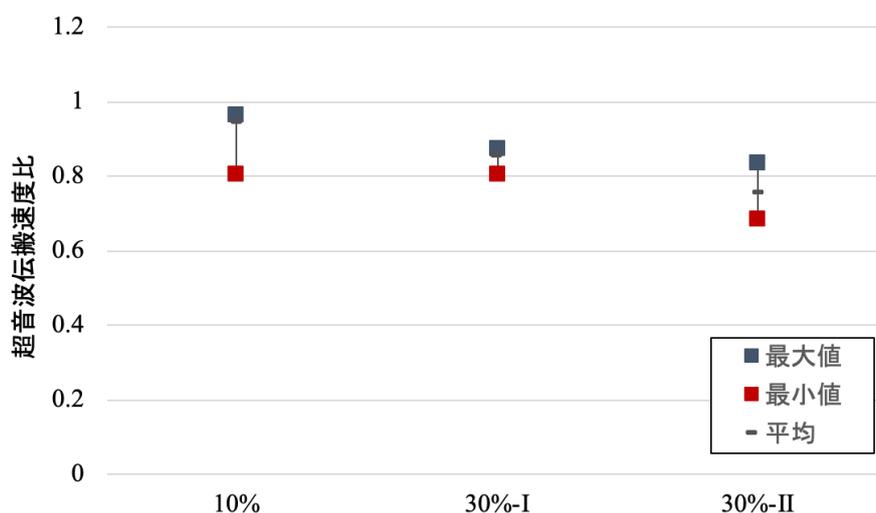


図 4-7 超音波伝播速度比 (穿孔後／穿孔前) <sup>[4-11]</sup>より図を加工

## 4.5 Step2 蟻害劣化を生じさせた木材試験体による検討

### 4.5.1 縦圧縮载荷試験

#### 4.5.1.1 実験概要

4.4 節において模擬劣化させた試験体に対して、樹脂充填による補強効果が確認できたため、本項においては、実際に蟻害によって劣化を生じさせた試験体に対し、樹脂充填の効果の検証および载荷した際の挙動の確認を行う。短期間で蟻害が進行するマツ材を対象として、イエシロアリによる蟻害促進を、6月中旬から7月中旬までの温暖期間において約1ヶ月間、屋外暴露試験にて実施した。部材寸法は105×105×100mmとし、うち8体を蟻害促進、2体をリファレンス（健全試験体）として用意した。蟻害後の試験体は蟻害前の試験体に対して質量減少率は平均で88%程度であった。圧縮試験体については、蟻害劣化試験体は模擬劣化試験体と異なり断面内での欠損の分布が不均一となるため、JIS Z 2101（木材の試験方法）の寸法比を参考に、Step1における30×30×60mmの試験体よりも大きな寸法（50×50×100mm）とし、105×105×100mmの部材から当該寸法の試験体を切り出すこととした。

写真4-4に蟻害劣化試験体を示す。(a1)は健全試験体、(a2)は(a1)の蟻害後の試験体、(b1)に示すのは(a1)を4分割した充填前の試験体、(b2)は切り出した(b1)の充填後の試験体である。

蟻害劣化試験体への樹脂充填において、試験体の周囲を透明テープで覆い外部への放出を防ぐとともに内部への充填状況を確認しながら行なった。細かい空隙部分には注射器を用い細部まで充填を行った。樹脂が固化した後にテープを剥がし脱型した。

今回の試験体は心材を含む材を多く使用しているが、写真4-4に示すように、辺材部分から年輪に沿って食害が進んでおり、食害の程度としては比較的浅いものと考えられる。なお本実験においては、蟻害劣化試験体を4分割にした状態で樹脂を充填するとしたため、今回の実験においては、面積や体積の減少率について定量的な評価は行っていない。この点については今後の検討課題としたい。

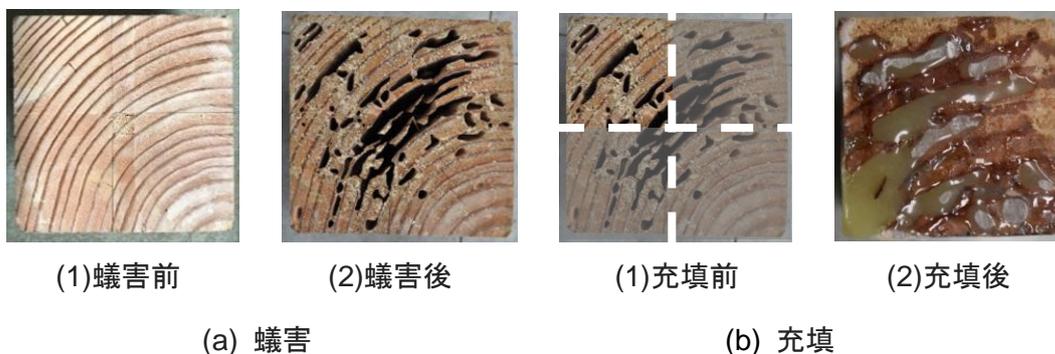


写真4-4 蟻害劣化試験体<sup>[4-11]</sup>より図を引用・加工

#### 4.5.1.2 劣化探査

図 4-8 に超音波伝播速度比と質量の変化率を示す。図中には 4.4 項で検討した模擬劣化試験体の結果も示している。決定係数  $R^2=0.84$  から相関性が高いといえる。このことから超音波伝播速度比から蟻害の表層そして内部の被害を探知することが可能と考える。また、30%-I の傾向は蟻害劣化とは異なるものとなっており、同一の欠損率においても 30%-II のように小さな空隙が多いものの方が実際の劣化に近いモデルであることが確認できた。

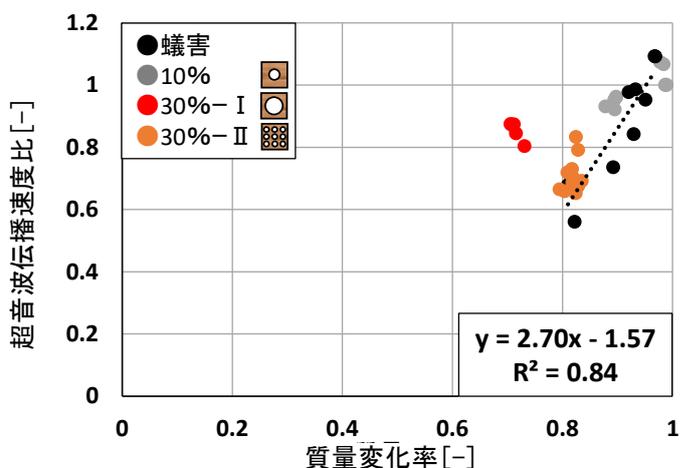


図 4-8 超音波伝播速度と質量の変化率<sup>[4-11]</sup>の図を引用

#### 4.5.1.3 目視評価

目視での劣化グレードの評価基準は表 4-5 に示す。健全をグレード 0 とし蟻害が大部分にみられる場合グレード 4 と分類した。実際の劣化グレードごとの試験体写真を写真 4-5 に示す。これらの試験体に対し、質量および超音波伝播速度を計測するとともに、3章で示したのと同様に目視による劣化状態評価を行った。これは本実験において、蟻害劣化させた試験体から小試験体を切り出していることから、新たに切り出し面を含めた劣化状態の評価が必要となるためである。評価指標については、表 4-6 に示すように、全く蟻害していないものを 0 とし、ほぼ蟻害を受けていない (グレード 1)、蟻害がほとんど見られない、わずかに蟻道・食痕を確認 (グレード 2)、一部に蟻道・食痕を確認 (グレード 3)、大部分に蟻道・食痕を確認 (グレード 4) の 5 段階で示した。グレード分けされた試験体を写真 4-5 に示す。その後一部の試験体に樹脂充填を行い、超音波伝播速度測定後、模擬劣化試験体と同様の縦圧縮試験を行った。

本項では、超音波法による蟻害劣化の損傷程度と樹脂充填状況の評価を行い、圧縮試験にて補強効果の検討を行った。なお、樹脂充填にあたり、二面の超音波伝播速度のうち安全側である低い値で劣化を評価し、速度減少率 0.8 以下となる試験体を要補

強試験体とし 10 体を選定した。このうち半分の 5 体を対象として樹脂充填による補強を施すこととした。次に要確認試験体として速度減少率 0.9~0.8 の試験体 8 体を選びうち 4 体を充填補強する。速度減少率が 0.9 以上となった試験体では劣化がほとんどないと推定し 12 体には充填補強は行わず強度の評価を行うこととした。

超音波伝播速度と劣化グレードの関係も図 4-9 に示す。目視と超音波伝播速度の相関は決定係数  $R^2=0.45$  と一定の範囲内での相関が確認できた。

表 4-6 目視の劣化グレード<sup>[4-8]</sup>

| グレード | 状況           |
|------|--------------|
| 0    | 健全           |
| 1    | 蟻害ほとんど見られない  |
| 2    | わずかに蟻道・食痕を確認 |
| 3    | 一部に蟻道・食痕を確認  |
| 4    | 大部分に蟻道・食痕を確認 |



a) 劣化グレード 1



b) 劣化グレード 2



c) 劣化グレード 3



d) 劣化グレード 4

写真 4-5 蟻害劣化試験体の例

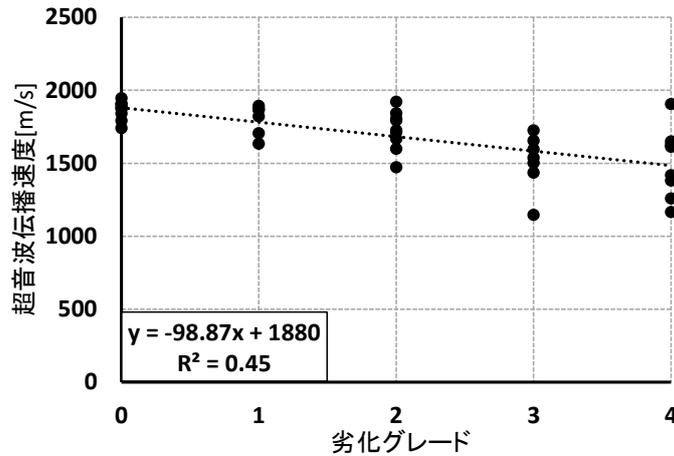


図 4-9 超音波伝播速度と劣化グレードの関係 [4-12]の図を引用

#### 4.5.1.4 縦圧縮载荷試験結果

縦圧縮強度と目視による劣化評価によるグレード結果（以下、劣化グレード）の関係を図 4-10 に示す。なお同図には、マツの無等級材の基準強度  $22.2\text{N/mm}^2$  と短期許容応力度  $14.8\text{N/mm}^2$  を併記する。同図に示すように、劣化グレードが上がるにつれて質量減少率とともに縦圧縮強度が低下しており、特にグレード 4 ではリファレンスと比較すると縦圧縮強度が半分まで低下していることがわかる。このことから、グレード 4 において基準強度を下回る可能性が高いため、本研究の範囲内では、グレード 4 レベルであっても樹脂充填により約 1.8 倍強度が上昇し、蟻害がほとんど見られない試験体と同程度の縦圧縮強度となるまでの改善がみられた。

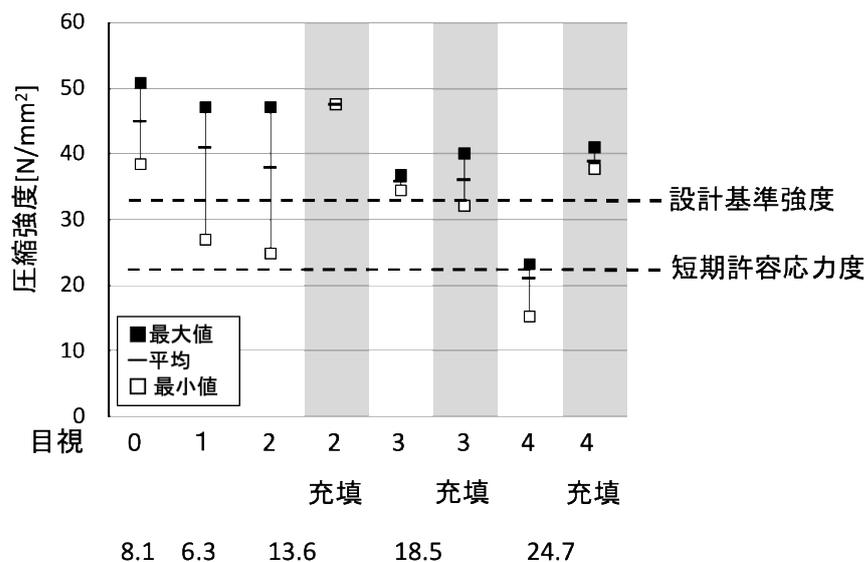


図 4-10 圧縮強度と目視による劣化評価によるグレードの関係 [4-12]の図を引用・加工

#### 4.5.1.5 樹脂の充填性の評価

図 4-11 にリファレンス試験体を基準とした超音波伝播速度比と質量変化率の関係を示す。両者の相関性は  $R^2=0.84$  と高く、超音波伝播速度比から蟻害の表層ならびに内部の被害を質量比の観点で評価できる可能性があるものとする。

超音波伝播速度と目視グレードの相関を図 4-12 に、リファレンス試験体を基準とした超音波伝播速度比と質量比の関係を図 4-13 示す。なお、本図においては劣化グレードとの比較も意図して x 軸にグレード毎の質量減少率をキャプションとして示しているが、実際の蟻害では断面外観の劣化と内部劣化の条件が一致しない事例も多くあり、目視による劣化グレードとの比較においては今後検討が必要と考える。

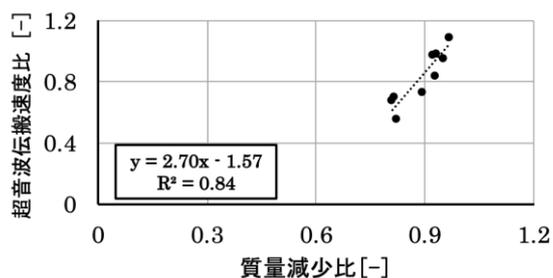


図 4-11 リファレンス試験体を基準とした音波伝播速度比と質量変化率の関係<sup>[4-12]</sup>の図を引用

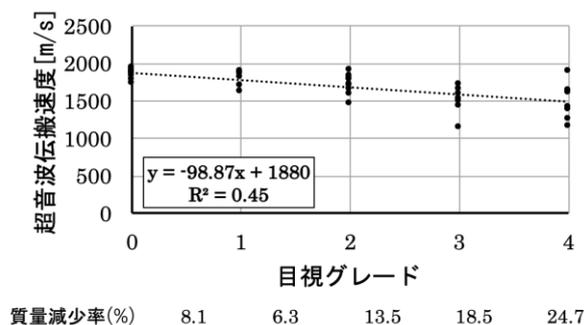


図 4-12 目視グレードと超音波伝播速度の関係<sup>[4-12]</sup>の図を引用

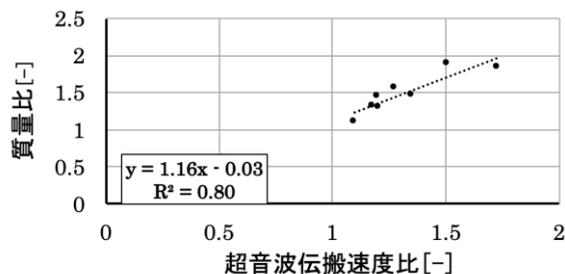


図 4-13 リファレンス試験体を基準とした超音波伝播速度比と質量比の関係<sup>[4-12]</sup>の図を引用

## 4.5.2 蟻害曲げ載荷試験

### 4.5.2.1 実験概要

木造建造物が蟻害を受ける部位として大引きや土台などが考えられるため、曲げに対する補強効果も検討することとした。本実験では 105×105×1000mm のマツ材試験体 13 体を用意し、3 体をリファレンスとして食害させず、残りの 10 体については 2017 年 4 月から 7 月にかけて約 3 ヶ月間、前章と同様の屋外暴露を行った。

各試験体の質量を計測したうえで暴露し、暴露後に質量測定とともに音波伝播速度を測定する。超音波伝播速度の測定方法は透過法及び表面法とする。その後樹脂充填を行い再び質量測定および超音波試験により超音波伝播速度の計測を行う。そして曲げ載荷試験を行い補強効果の確認を行う。樹脂には蟻害劣化部材に対する圧縮載荷試験で用いたものを使用する。

試験体一覧を表 4-7 に示す。BN が蟻害なし、BA が充填なし、BR が充填ありとし、蟻害度は蟻害前後の質量変化から算出している。充填の有無は蟻害期間および蟻害度が同等になるように選別を行った。BA の蟻害度平均が 0.70、BR の蟻害度平均が 0.72 となっている。

表 4-7 蟻害曲げ載荷試験体一覧<sup>[4-12]</sup>の図を引用

|      | No.  | 質量 [kg] |      | 蟻害度  | 蟻害期間     |
|------|------|---------|------|------|----------|
|      |      | 蟻害前     | 蟻害後  |      |          |
| 蟻害なし | BN-1 | 6096    |      | -    | -        |
|      | BN-2 | 5146    |      | -    | -        |
|      | BN-3 | 5320    |      | -    | -        |
| 充填なし | BA-1 | 5250    | 4160 | 0.79 | 4/8~7/21 |
|      | BA-2 | 5200    | 3405 | 0.65 | 4/8~7/21 |
|      | BA-3 | 4950    | 3745 | 0.76 | 4/8~7/21 |
|      | BA-4 | 5150    | 3666 | 0.71 | 4/8~8/1  |
|      | BA-5 | 5450    | 3178 | 0.58 | 4/8~10/9 |
| 充填あり | BR-1 | 5450    | 4040 | 0.74 | 4/8~7/21 |
|      | BR-2 | 5000    | 3455 | 0.69 | 4/8~7/21 |
|      | BR-3 | 5550    | 3740 | 0.67 | 4/8~8/1  |
|      | BR-4 | 5650    | 3480 | 0.62 | 4/8~10/9 |
|      | BR-5 | 5950    | 5285 | 0.89 | 4/8~10/9 |

曲げ載荷試験は JIS Z 2101（木材の試験方法）に準じ、支点間距離 800mm として 3 点荷重曲げ載荷試験を行った。試験の様子を写真 4-6，試験の概要図を図 4-14 に示す。

樹脂硬化後に養生テープを剥がし、再度超音波伝播速度を測定した。曲げ載荷試験では蟻害による強度低下と樹脂充填による補強効果を確認した。図 4-15 に充填工程の概要図を示す。写真 4-7 に充填前後の蟻害劣化試験体写真を(a)が充填前，(b)が充填後として示す。



写真 4-7 載荷時の写真

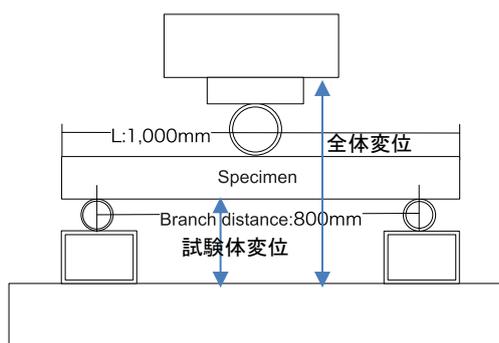
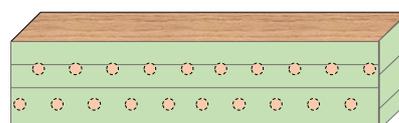


図 4-14 セットアップ概要図



1) 養生テープを上面に以外に巻く



2) ドリルで片側から穿孔



3) ガンを用いて樹脂充填



4) 硬化後に養生テープを剥がす

図 4-15 充填工程の概要図



(a) 蟻害後 充填前



(b) 充填後

写真 4-7 試験体充填前後の写真<sup>[4-12]</sup>の図を引用・加工

#### 4.5.2.2 蟻害曲げ載荷試験結果

曲げ載荷結果を図 4-16 に示す。蟻害劣化試験体はリファレンスである健全試験体と比べ曲げ荷重が 40%ほど低下しているが、樹脂を充填することにより約 20%の荷重の向上が認められた。

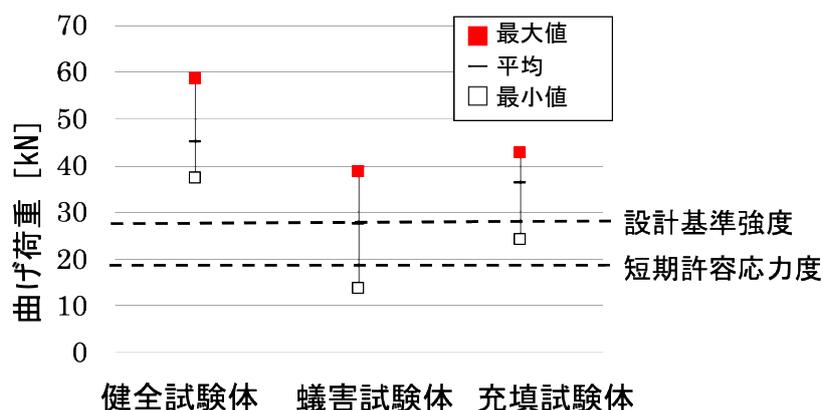


図 4-16 曲げ載荷試験結果<sup>[4-12]</sup>の図を引用・加工

図 4-17 に曲げ荷重と変位の関係を示す。曲げヤング係数は傾きが直線に近い部分を目視により  $E$  と定め、下記の式で求めた。なお、蟻害試験体に対しても外形寸法で算出した。

$$E = \frac{L^3 P}{48I \delta} \quad \text{式 4-1}$$

$E$  : ヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)

$P$  : 荷量(N),

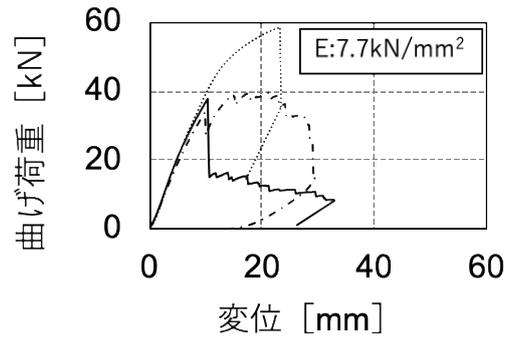
$I$  : 断面 2 次モーメント(mm<sup>4</sup>)

$L$  : スパン(mm)

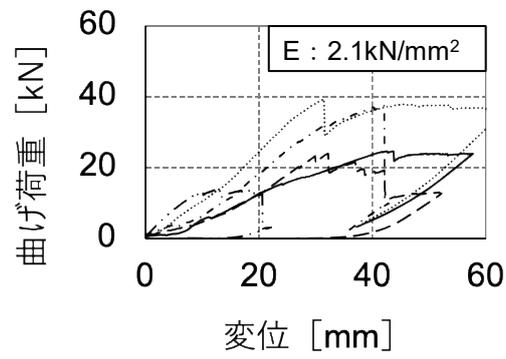
$\delta$  :  $P$  に対応する荷重点の垂直変位(mm)

曲げヤング係数の高い順から健全試験体 (平均 7.7 kN/mm<sup>2</sup>)、充填試験体 (平均 4.9 kN/mm<sup>2</sup>) および蟻害劣化試験体 (平均 2.1 kN/mm<sup>2</sup>) となり、樹脂充填により曲げヤング係数を一定程度回復できることがわかる。

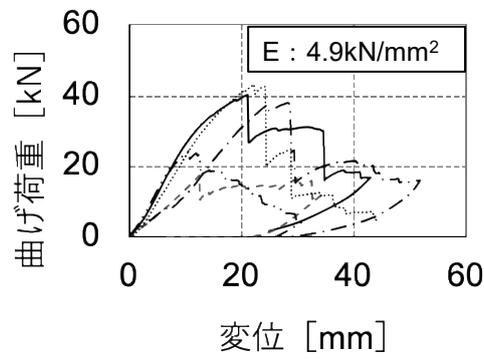
以上のことから、充填による曲げ材に対する補強は、一定の有効性はあるものの、その効果は限定的であると考えられる。



a) 健全試験体



b) 蟻害試験体



c) 充填試験体

図 4-17 曲げ荷重と変位関係<sup>[4-12]</sup>の図を引用・加工

### 4.5.2.3 曲げ強度の推定

曲げ強度に最も影響を及ぼすと推測される載荷時の最下面へ超音波試験の表面法を適用し、端子間距離を 800mm, 400mm, 200mm とした場合の超音波伝播速度を図 4-18 に示す計測位置で計測した。曲げ荷重と表面法による超音波伝播速度の関係を図 4-19 に示す。800mm, 400mm ではデータのばらつきも大きく、相関を確認できないものの、200mm 地点での計測では一定の相関がみられる結果であった。また、上面に圧壊が確認された試験体において上面（載荷面）の表面法の値を用いた結果を図 4-19 (c-2) に示す通り、破壊面の超音波伝播速度と曲げ強度には相関があるといえる。

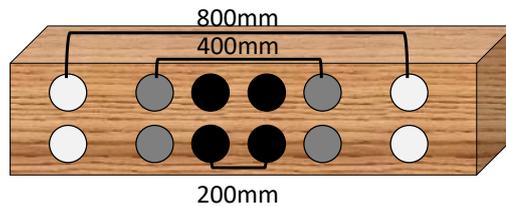


図 4-18 表面法の計測位置

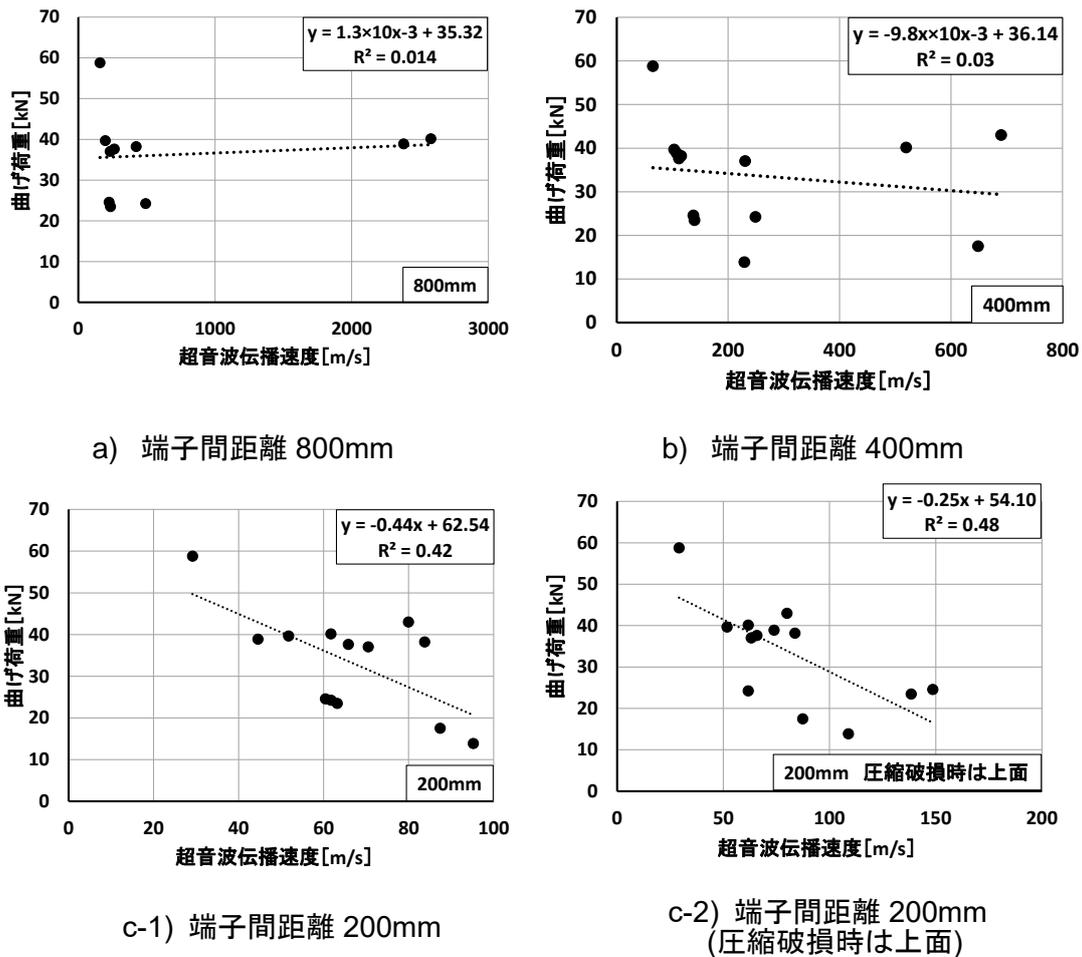


図 4-19 曲げ荷重と表面法による超音波伝播速度の関係 [4-12]より図を引用

曲げ強度と透過法による超音波伝播速度の関係を図 4-20 に示す。相関は低く、曲げ強度の推定において、透過法は有効でないといえる。

以上の結果より、曲げ強度の推定では表面法が有効であるといえる。また、当該データのみで曲げ強度を推定できると判断することは難しいが、一定の相関は見られるため、今後とも引き続き収集を進め、その傾向について検討する。

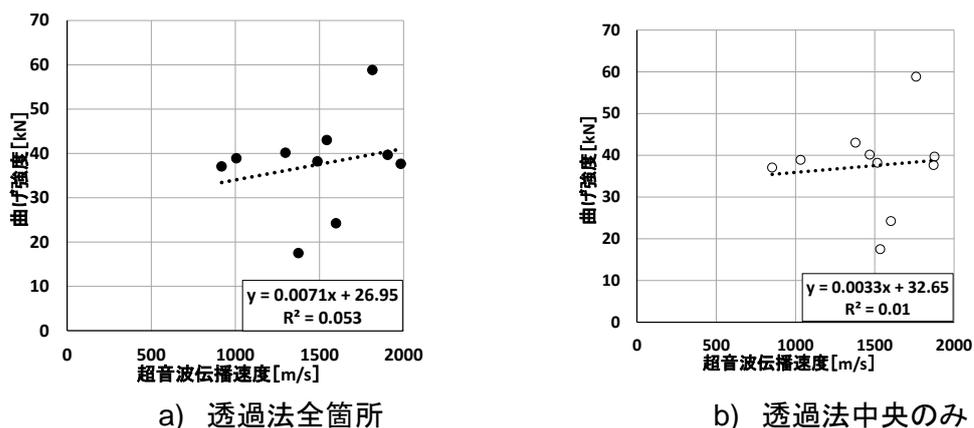


図 4-20 曲げ強度と透過法による超音波伝播速度の関係<sup>[4-12]</sup>より図を引用・加工

#### 4.5.2.4 劣化探査

透過法によって測定された超音波伝播速度について、蟻害試験体とリファレンスの比較を図 4-21 に示す。一面から 7 箇所以上測定できた試験体を対象とし、その平均値について示すものである。蟻害劣化試験体ではリファレンスである健全試験体と比較して平均して 50%ほど伝播速度が低下していることがわかる。内部の空隙部分が多いほど伝播速度は低下することから、蟻害による欠損を探知している可能性がある。

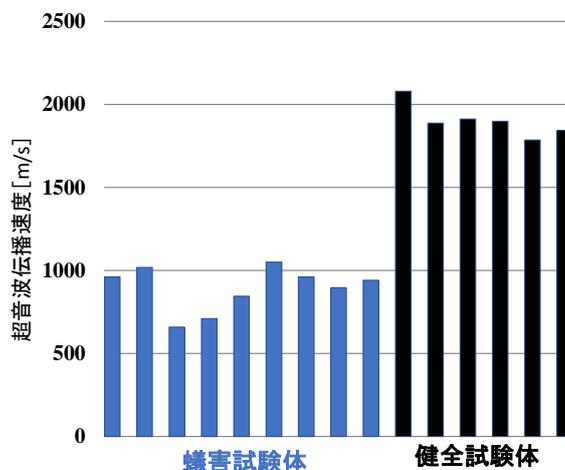


図 4-21 超音波伝播速度結果一覧<sup>[4-12]</sup>より図を引用

#### 4.5.2.5 樹脂の充填性評価

樹脂充填前後の透過法による超音波伝播速度の関係を図 4-22 に示す。充填を行うことで超音波伝播速度が 150%～240%に上昇していることがわかる。加えて、曲げ載荷試験後に試験体を切断し内部の欠損ならびに樹脂充填状況を確認した。断面の写真を写真 4-8 に示す。写真 4-8 から充填が緻密にされていることが確認された。また、質量測定結果より、蟻害前の試験体に対して 1.0～1.2 倍、蟻害後の試験体に対しては、1.2～1.7 倍という結果となっていることから、充填は十分に行われていると推察されるとともに超音波試験の透過法を用いた樹脂充填状況の評価も可能であるといえる。

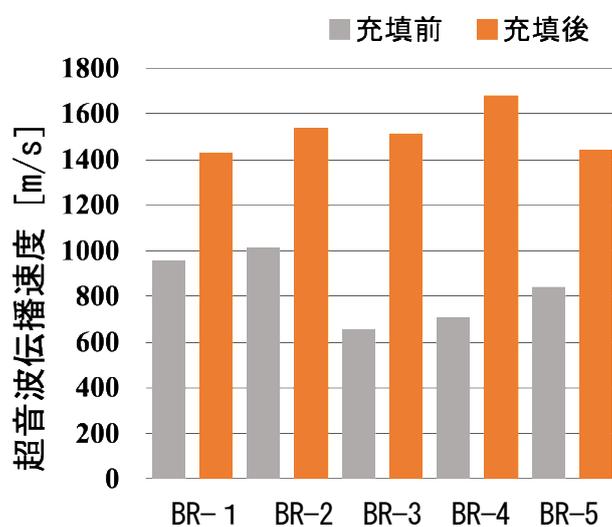


図 4-22 充填前後の超音波伝播速度関係 [4-12]より図を引用

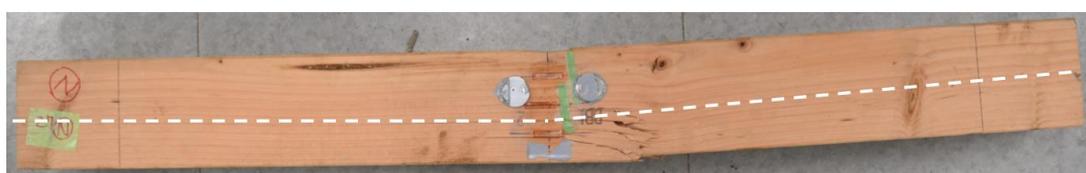


写真 4-8 試験体断面写真

#### 4.5.2.6 破壊性状

曲げ载荷試験後の破壊性状の試験体写真を写真 4-9 に示す。写真 4-9 の点線で示すように、健全試験体では下端における曲げ破壊の性状を呈したのに対し、蟻害劣化試験体では食害により木材組織が脆弱となっているため、载荷点でめり込み破壊が生じた。

一方、樹脂充填による補強試験体では健全試験体と同様の曲げ破壊形式となった。適切な樹脂の選定などにより、曲げ耐力の向上は期待できるため、樹脂の種類および注入方法などの施工方法を検討することが重要であると考えられる。



(a)健全試験体



(b)蟻害試験体



(c)充填試験体

写真 4-9 曲げ载荷試験後の破壊性状の試験体写真<sup>[4-12]</sup>より図を引用・加工

## 4.6 Step2 蟻害劣化を生じさせた木材試験体による検討

### ～接合部材を対象とした検討

#### 4.6.1 実験概要

前項までに、蟻害劣化を生じさせた木材材に対して樹脂充填による補強効果について、圧縮載荷試験や曲げ試験を実施し、基本的な性能の把握を行なった。実建築においては、柱脚部分や接合部近辺は蟻害が進行した際に構造的にダメージを受けやすいため、前章と同様に、イエシロアリによる蟻害促進を行った。試験体は 105×105×1200mm の製材（以下、I 材）9 体および 105×105×600mm と 105×105×1000mm の製材を図 4-23、写真 4-10 に示すように土台接合部を模して組み合わせたもの（以下、T 材）8 体を用意し、1 ヶ月から 3 ヶ月間暴露試験で屋外暴露にて蟻害させた。材寸法は、横架材 105×105×1000mm と柱 105×105×600mm、接合部はほぞ継とし、ほぞの大きさは 30×75×50mm（ほぞ穴 30×75×80mm）とした。縦圧縮載荷試験・せん断曲げ試験と同様に質量減少率によって食害度 10%、15%、20%のグループ分けを行い樹脂充填による補強を行った。表 4-8 に接合部試験体一覧を示す。

4.4.2 で物性評価を行なった材料試験に加え、同じく試験体サイズは 20×20×40mm とし、5 体の試験体に対して JIS Z 2101（木材の試験方法）に準じて縦圧縮載荷試験を行なった。結果を表 4-9 に示す。

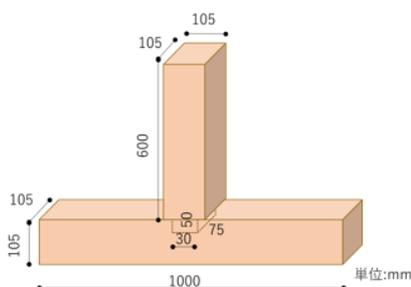


図 4-23 試験体概要図

表 4-8 接合部試験体パラメータ

| 健全     |       |        | 2体    |     |    |
|--------|-------|--------|-------|-----|----|
| 蟻害     | 無補強   | 質量減少率  | 10%   | 1体  |    |
|        |       |        | 15%   | 1体  |    |
|        |       |        | 20%   | 1体  |    |
|        | 補強あり  | 硬質エポキシ | 質量減少率 | 10% | 1体 |
|        |       |        |       | 15% | 1体 |
|        |       |        |       | 20% | 1体 |
| 弾性エポキシ | 質量減少率 | 10%    | 1体    |     |    |
|        |       | 15%    | 1体    |     |    |



写真 4-10 試験体の様子

表 4-9 圧縮強度結果

| 種類     | ポアソン比 | ヤング係数<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------|-------|-------------------------------|
| 硬質エポキシ | 0.48  | 36.2                          |
| 弾性エポキシ | 0.4   | 0.52                          |

#### 4.6.2 蟻害接合部せん断曲げ試験結果

蟻害劣化した、木材接合部に対して、せん断曲げ試験を行なった。試験体の横架材を反力フレームに固定し、柱上部に銅板を載せ、反力フレームに固定したボルトでこれを支持し、銅板上部に取り付けた4箇所のナットを均等に荷重が加わるように締めて載荷を行なった。セットアップ図を図4-24に示す。また銅板と柱頭の間をローラーで挟むことで水平荷重が円滑に接合部に加わるようにした。これらの荷重全てを合計し、鉛直荷重を10kNとした。試験は柱材上部(横架材上面から500mm)の位置を油圧ジャッキにより水平力を加え、ジャッキの引き戻し側を-側、押し出し側を+側とし正負繰り返し加力を行った。加力サイクルは見かけのせん断変形角が1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50radを正負それぞれ3回ずつ行い、その後、1/30, 1/15, 1/10radを正負それぞれ1回ずつ行った。写真4-12に実験の様子を示す。

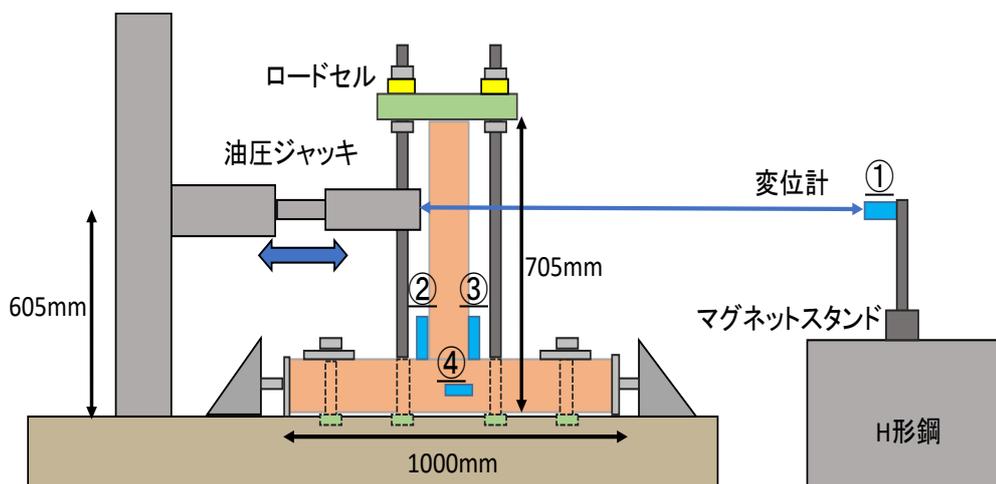


図4-24 セットアップ図



写真4-12 実験の様子

### 4.6.3 蟻害接合部せん断曲げ試験結果

図 4-25 に水平荷重と変位の関係を示す。健全試験体については、最大荷重・変位ともに 2 つの試験結果が概ね一致する結果となった。補強なし試験体では、質量減少率が大きくなるほど荷重が減少した。硬質エポキシ充填試験体については 変位については健全試験体と同等だが、健全試験体よりも荷重が大きくなる傾向が見られた。弾性エポキシ充填試験体については、特に質量減少率 15%の試験体を補強したのについて、最大荷重・変位ともに健全試験体とほぼ同様の結果を示した(図 4-26) ことから、弾性エポキシによる補強が健全試験体と同等の補強効果があると言える。

一方で、硬質エポキシ充填試験体は、健全試験体を上回る実験結果となったことは、充填した樹脂でほぞ接合部に対して補強効果が得られたことに起因すると考えられる。

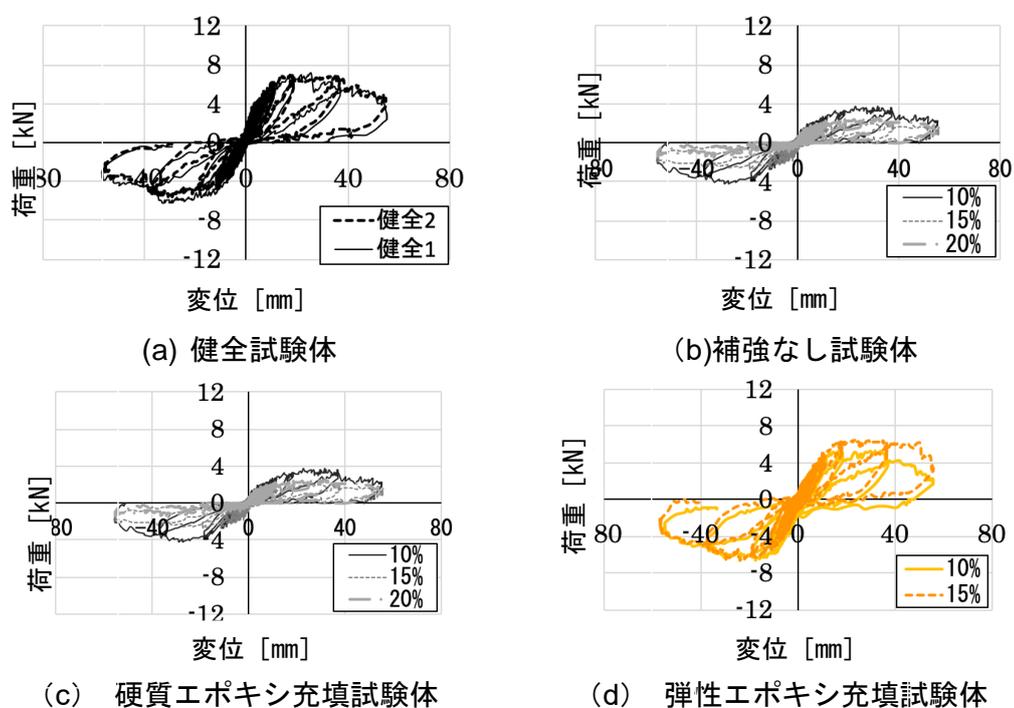


図 4-25 水平荷重と変位

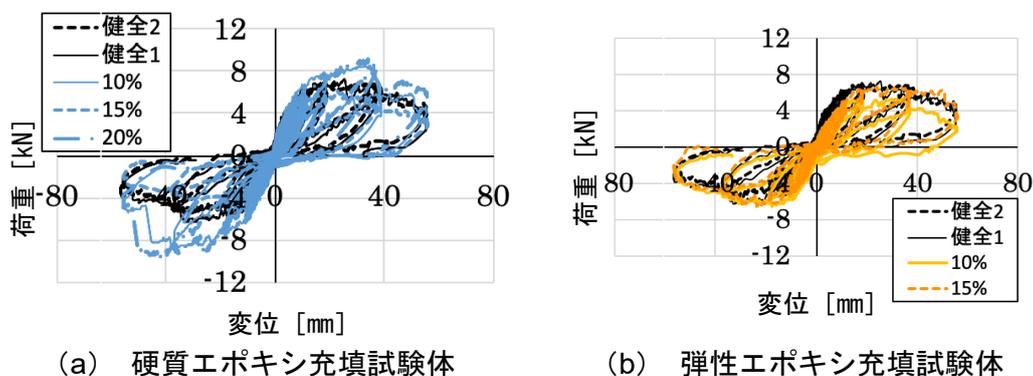


図 4-26 水平荷重と変位(健全体比較)

図 4-27 に最大せん断荷重一覧を示す。硬質エポキシおよび弾性エポキシ充填試験体は健全試験体の最大荷重の 0.7-1.3 倍となった。

また、硬質エポキシ充填試験体と樹脂充填なし試験体を比較すると質量減少率 10% で約 2.3 倍、質量減少率 15% で約 2.9 倍、質量減少率 20% で約 3.6 倍の荷重増加となり、高い補強効果が確認された。同様に弾性エポキシ充填試験体と樹脂充填なし試験体を比較すると質量減少率 10% で約 1.4 倍、質量減少率 15% で約 3.1 倍となり弾性エポキシよりも硬質エポキシ充填試験体の方が高い補強効果を示した。

また、質量減少率 20% の硬質エポキシ充填試験体では変形角が 1/15rad のときに正負方向共に最大荷重となり、全試験体の中で最大荷重が最も高い結果となった。

図 4-28 に充填後と蟻害前の質量変化率を示す。図 4-27 で示す試験体のうち、充填した試験体において最大荷重が低かった硬質エポキシ充填における質量減少率 15% および弾性エポキシ充填試験体における質量減少率 10% は、質量変化率が 88-92% となっており、他の試験体に比べると 5% 以上低い結果となっている。以上より、充填が不十分であることが荷重の低さの要因であると言える。

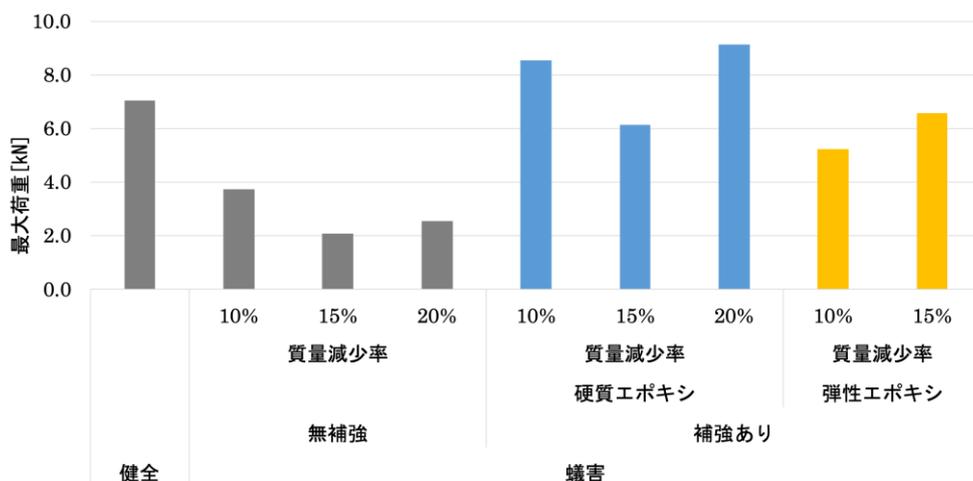


図 4-27 最大せん断最大荷重一覧

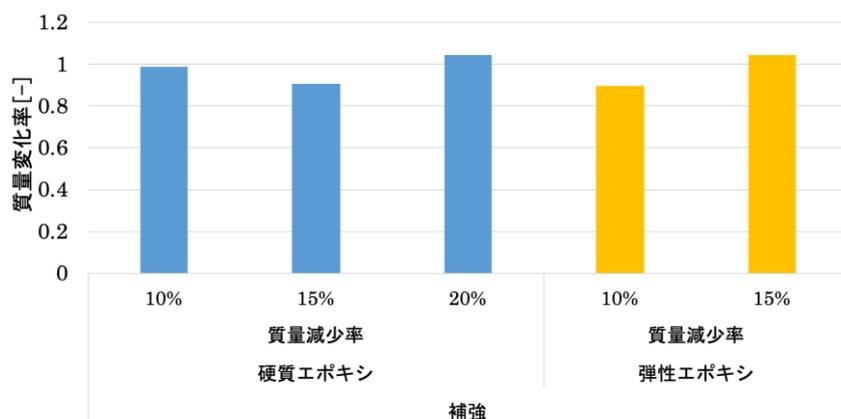


図 4-28 充填後／蟻害前の質量変化率

初期せん断剛性を図 4-29 に示す。健全試験体よりも硬質エポキシ樹脂で補強した質量減少率 10%の試験体の方が、高い初期剛性を示した。また、硬質エポキシ樹脂補強試験体については、健全試験体と比較すると 6 割程度ではあるものの、無補強試験体と比較すると、2 倍程度剛性が高くなっていることがわかる。弾性エポキシ樹脂については、質量減少率 20%のものについては、図 4-30 に示すように、健全および補強した試験体については、設計クライテリアで用いられる 1/200rad において剛性を保っていることが確認できた。

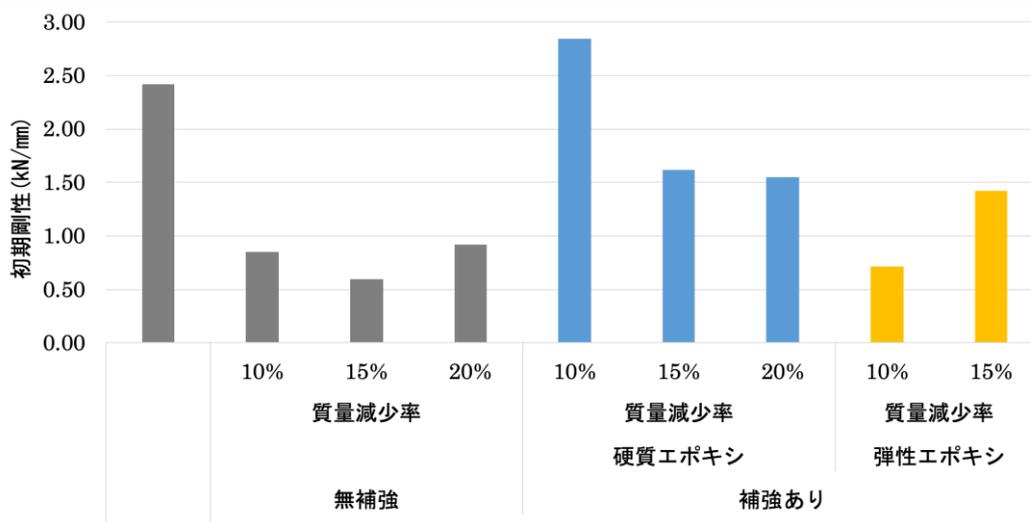


図 4-29 初期せん断剛性一覧

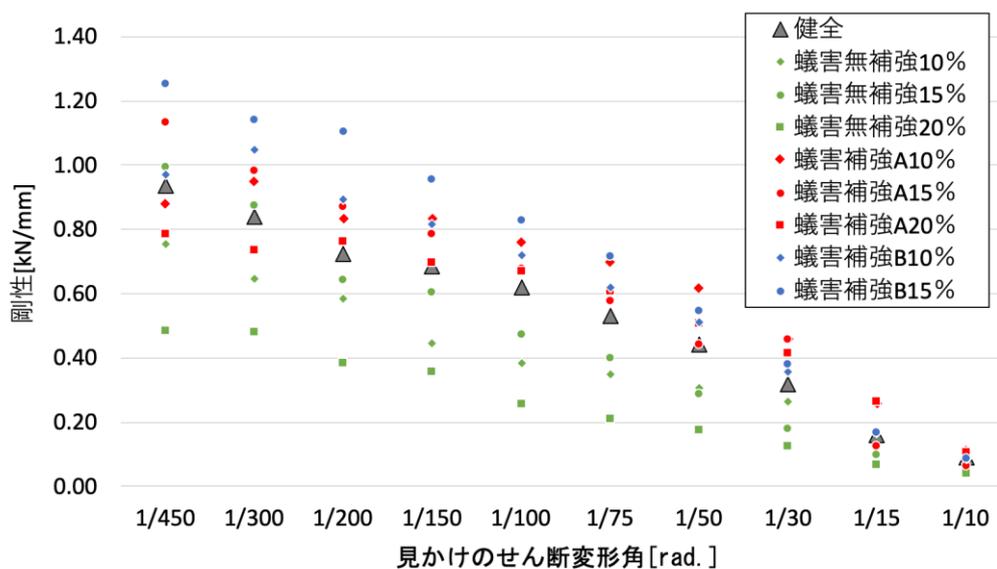
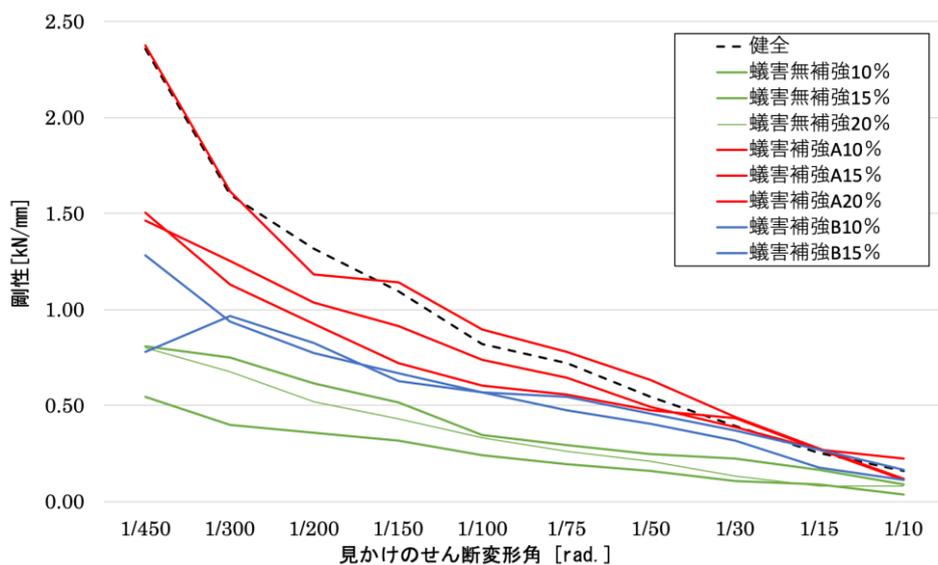
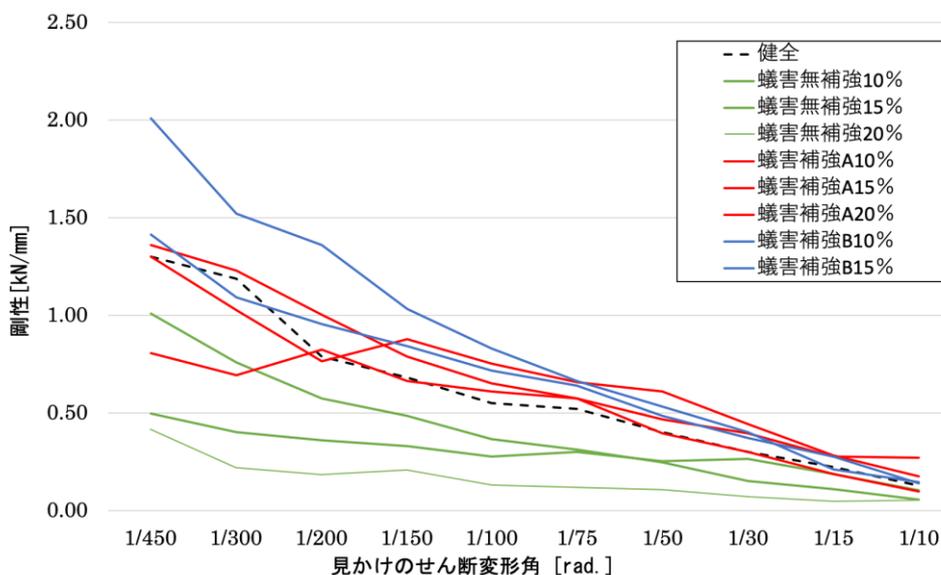


図 4-30 P-P' 剛性

また、剛性が一部ばらついていることについて、正負に分けて剛性の検討を行なった。  
 図 4-31 に示すように、正側の剛性は健全材>補強材（硬質エポキシ）>補強材（弾性エポキシ）>無補強であるのに対し、負側の剛性は全体的に低く出ている。特に健全試験体と硬質エポキシ補強（質量減少率 10%）の試験体において低くなっている。該当箇所  
 の最大荷重については、図 4-32 に示すように、正負で大きく乖離している。



(a) 正側



(b) 負側

図 4-31 割線剛性

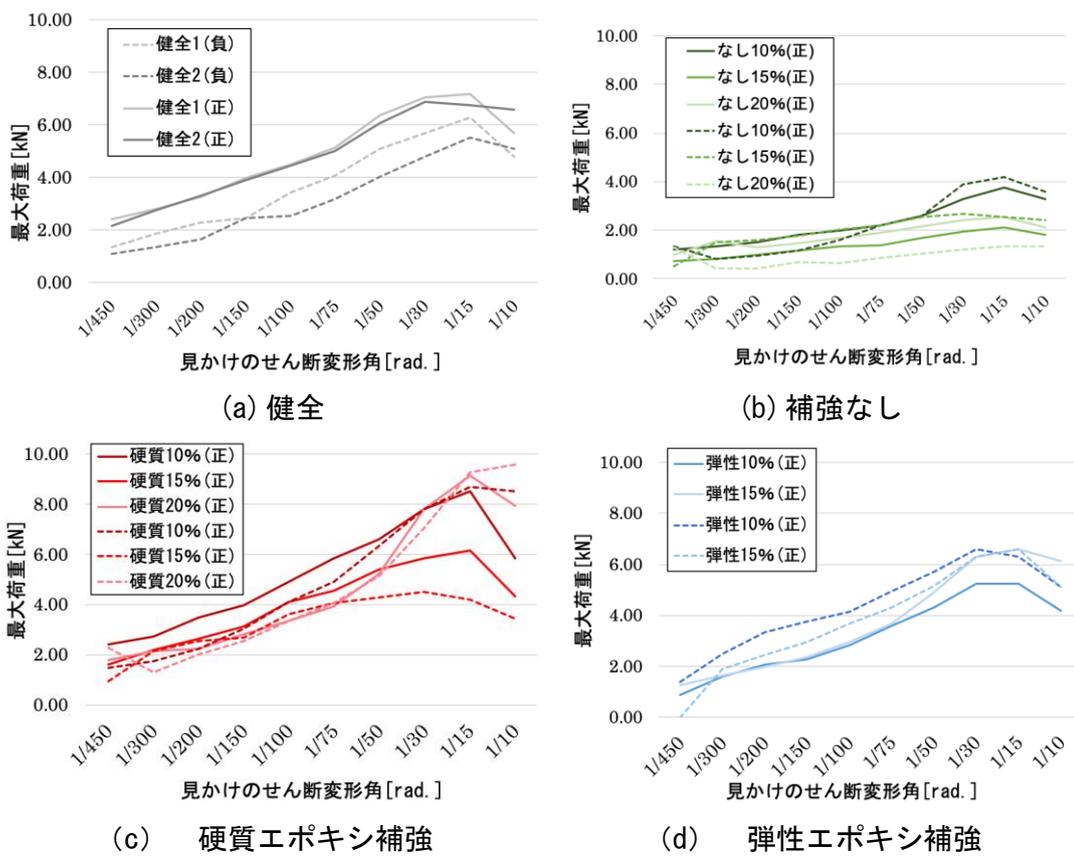


図 4-32 最大荷重推移

荷重が低い要因としては、油圧ジャッキを引き戻す際に、写真 4-12 に示すように、柱上部に載せた胴板が浮き試験体との間に隙間ができることで、荷重が伝わらず、剛性に影響が出たことも考えられる。

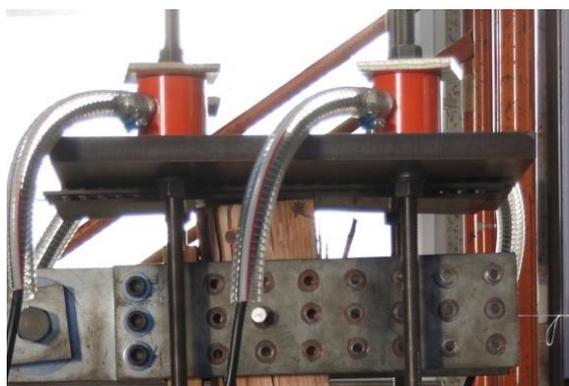


写真 4-12 負側載荷時の状態

#### 4.6.4 樹脂の充填性評価

写真 4-12 に超音波測定箇所を示す。土台想定材，柱想定材共に 200mm おきに健全材，蟻害材（蟻害あり充填なし材），補強材（蟻害あり充填あり）に対して超音波伝播速度を透過法により測定した。図 4-33 に蟻害あり充填なし，図 4-34 に蟻害あり充填ありの測定結果を示す。超音波伝播速度の測定結果より，土台想定材は接合部分を中心に蟻害が進み，柱想定材は一様に蟻害が進行していることがわかる。また，充填により特に接合部周辺が補強されていることが明らかとなり，せん断曲げ結果とも一致する結果となった。

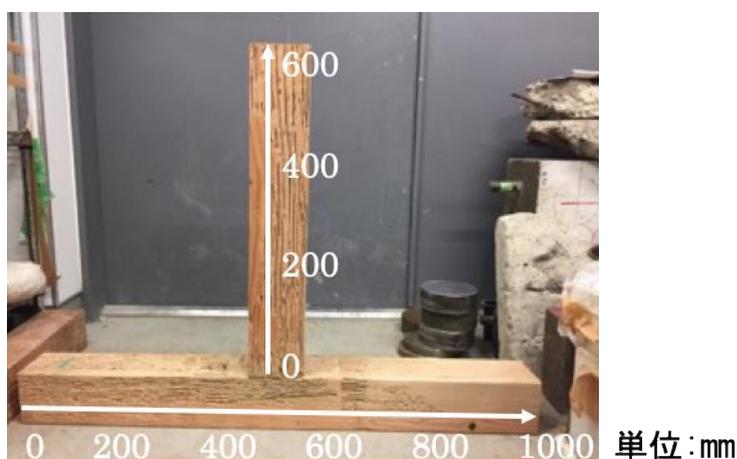


写真 4-12 超音波測定場所

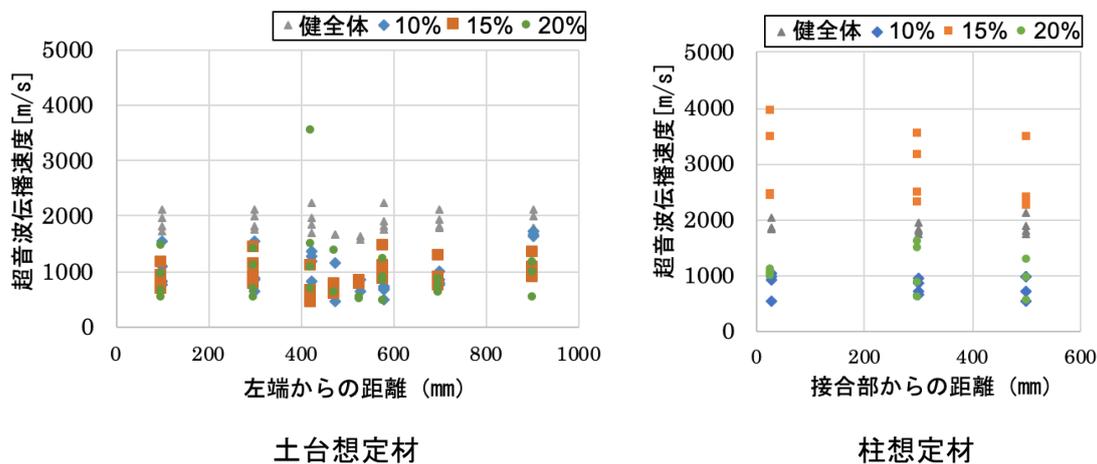
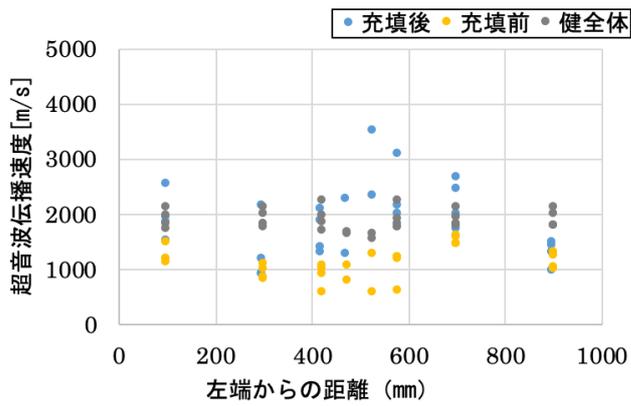
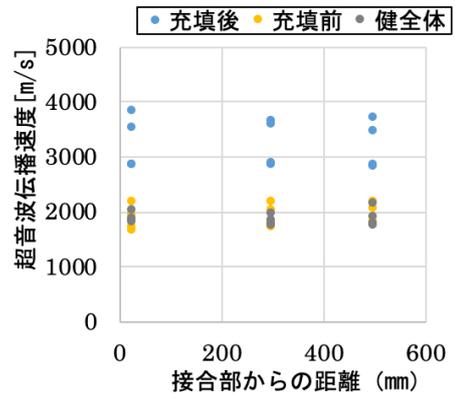


図 4-33 蟻害による超音波伝播速度の変化

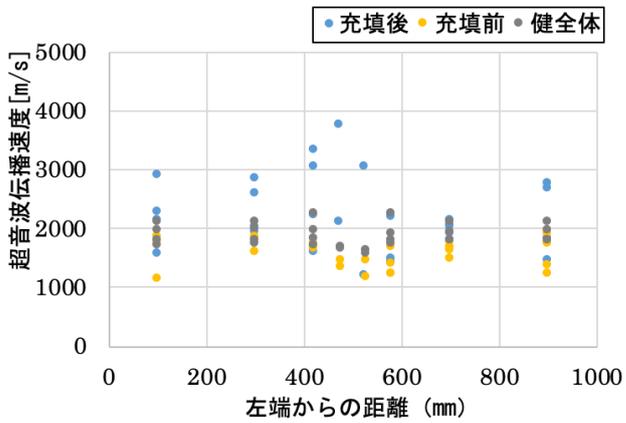


土台想定材

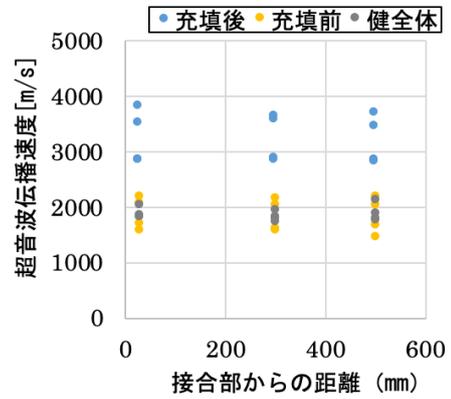


柱想定材

質量減少率 10%

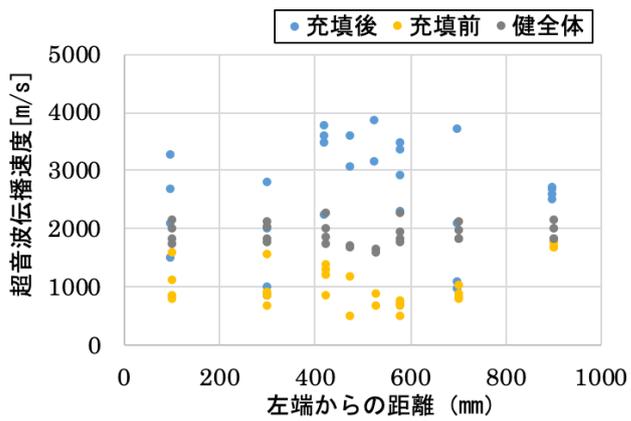


土台想定材

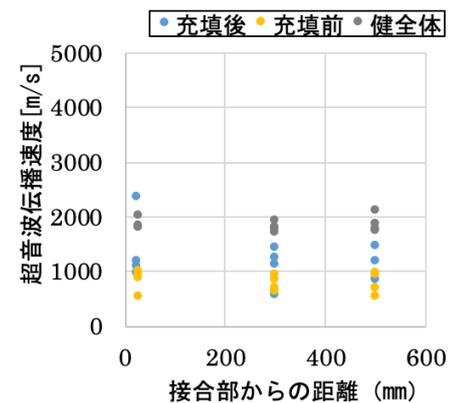


柱想定材

質量減少率 15%



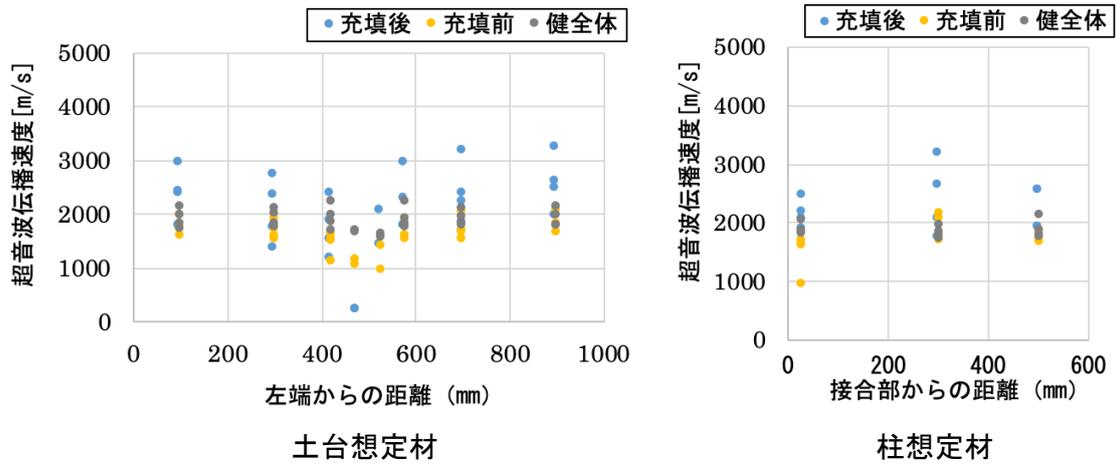
土台想定材



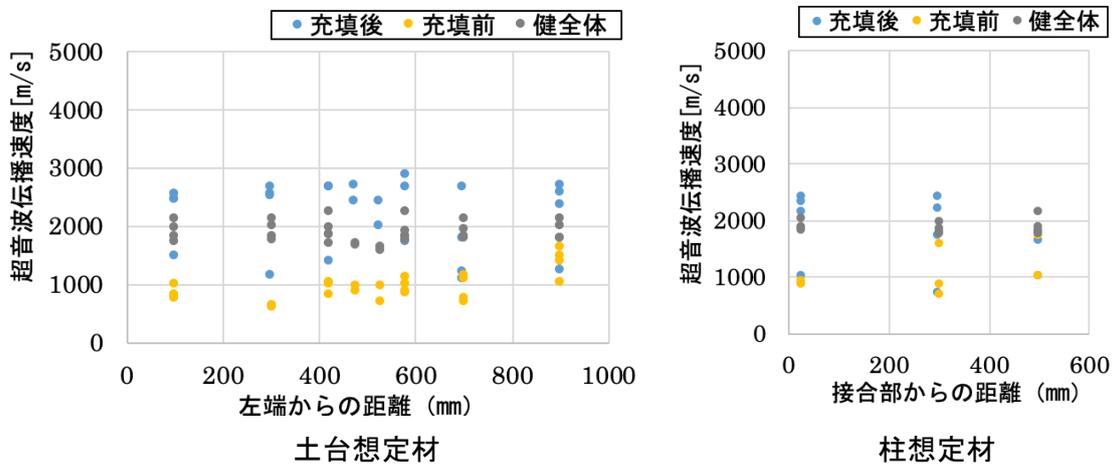
柱想定材

質量減少率 20%

図 4-34 硬質エポキシ樹脂補強による超音波伝播速度の変化



質量減少率 10%



質量減少率 15%

図 4-34 弾性エポキシ樹脂補強による超音波伝播速度の変化

充填前後の速度変化率の平均を図 4-35 に示す。充填前後の超音波伝播速度について、硬質エポキシ充填は 1.5-2.3 倍、弾性エポキシ充填については 1.3-2.0 倍となった。

図 4-36 に最大荷重増大率と超音波伝播変化率の関係を示す。両者の相関性は  $R^2=0.50$  と相関性は高いとはいえない。充填は十分されているので、超音波伝播速度の測定方法の再考が必要であると考ええる。

図 4-37 に剛性比率と超音波伝播比率の関係を示す。両者の相関性は  $R^2=0.78$  と高く、超音波伝播速度比から蟻害の表層ならびに内部の被害を質量比の観点で評価できる。

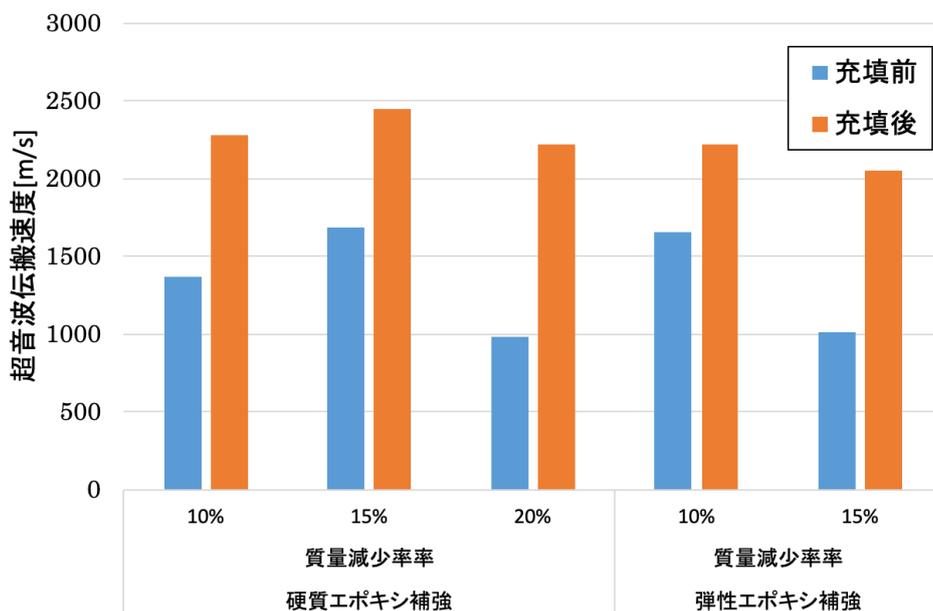


図 4-35 速度変化率(平均値)

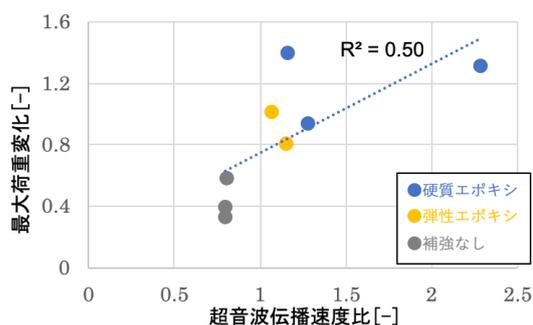


図 4-36 最大荷重増大率と超音波伝播速度変化比

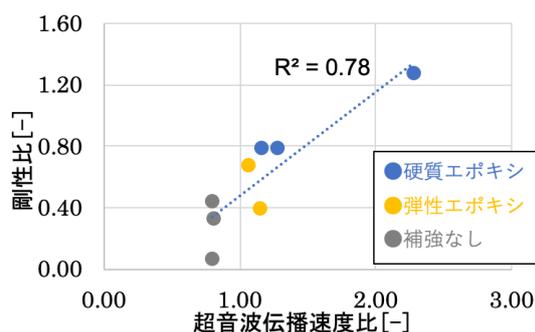


図 4-37 剛性比率と超音波伝播速度変化比

## 4.7 まとめ

本研究では、超音波試験の透過法による内部劣化した木材の欠陥探査および樹脂充填による補強法の確立を目的とし、模擬劣化試験体と蟻害試験体を対象として、超音波法による欠陥探査と樹脂充填状況の評価、および樹脂充填による補強効果の評価のために、蟻害劣化試験体の圧縮載荷試験、曲げ強度試験および土台接合部のせん断曲げ強度試験を行った。本研究において得られた知見を以下に示す。

- 1) 穿孔による木材の欠損状態の変化と樹脂の補強効果を検証するために、圧縮力を均等に負担できるように中心および均等かつ分散配置した孔を有する模擬劣化試験体を対象とし、超音波法による欠陥探査ならびに縦圧縮試験を行った。その結果、圧縮強度の明確な低下が認められた欠損割合 30%において、超音波速度の変化が認められた。また、樹脂充填を行った試験体に対しても超音波法を用いることで内部充填状況の推定が可能であることがわかった。樹脂充填によって、全ての試験体において劣化試験体よりも圧縮強度が上昇していることから、樹脂充填は劣化材の縦圧縮強度向上に一定の効果がみられることを示した。
- 2) 蟻害試験体を対象とした超音波法による内部劣化探査について、超音波伝播速度比と質量比、充填状況と超音波伝播速度比には高い相関が認められ、蟻害を受けた木材について、超音波伝播速度比から蟻害の表層ならびに内部の被害を質量比の観点で評価できる可能性が示唆された。
- 3) 蟻害が進行した曲げ部材を想定し、樹脂充填による補強効果を曲げヤング係数および曲げ荷重の観点から評価を行った。充填の状況を超音波による表面法で評価できることが確認されたものの、曲げ耐力の向上効果は圧縮強度ほど顕著ではなかった。
- 4) せん断曲げ試験において硬質エポキシ、弾性エポキシでの充填にて共に補強効果を確認することができた。また、剛性の回復も見られたことから樹脂充填による補強の有用性が示された。

今後は、劣化材の樹脂充填による曲げ性能の向上のほか、実部材における構造性能の向上に向けての検討を進めていく必要がある。

また、本論文で示された蟻害における食害の程度は限定的なものであるため、実際の蟻害を受けたケースにおける検討を、特に定量的な断面欠損量と樹脂充填の効果の関係等の点から進める必要があると考える。

#### [第4章の参考文献]

- [4-1] 中村昇ほか:ティンバーメカニクス - 木材の力学理論と応用, 日本木材学会 木材強度・木質構造研究会, 海青社, 2015.3
- [4-2] 田中俊成:超音波, 弾性波によるスギ実大腐朽材の強度性能評価, 第38回日本木材学会大会研究発表要旨集, pp.122, 1998
- [4-3] 森拓郎ほか:生物劣化を受けた木材の曲げおよび圧縮強度特性とその劣化評価, 材料, 第62巻, 第4号, pp.280-285, 2013.4
- [4-4] 竹之内裕ほか:文化財建造物の修復に用いられた合成樹脂の変遷, 保存科学, No.37, pp.99-123, 1998.3
- [4-5] 片岡 靖夫他:移築された古建築の構造材性能評価, 日本建築学会研究報告(東海), 31, pp.205-208, 1993.2
- [4-6] 野口昌宏ほか:シロアリ被害を受けた木材の縦及び横圧縮強度, 日本建築学会構造工学論文集 54B巻, pp.171-176, 2008.
- [4-7] 公益財団法人文化財建造物保存技術協会データベース, <http://www.bunkenkyo.or.jp/archive-site/index.html>, アクセス日時: 2018.9.12 17:00
- [4-8] 樋口清治:木造建造物化粧部材の保存と修復における合成樹脂の応用—法隆寺旧富貴寺羅漢堂と茶室如庵の場合—, 保存科学, No.10, pp.37-72, 1973.3
- [4-9] 吉武 正一他:木質構造の蟻害に関する研究:蟻害による強度低下と補強の試み, 日本建築学会研究報告(九州), pp.9-10, 2007.7
- [4-10] 関野克:重要文化財旧富貴寺羅漢堂国宝如庵の木質部材部保存修復における合成樹脂応用の開発, 保存科学, No.10, pp.1-8, 1973.3
- [4-11] 五郎丸修平他:内部が劣化した既存木造部材を想定した欠陥探査と樹脂充填による補強方法に関する実験的研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 第87巻, pp.61-64, 2017.2
- [4-12] 五郎丸修平他:内部劣化した既存木造建築物への欠陥探査と樹脂充填による補強法の提唱, 日本建築学会関東支部研究報告集, 第88巻, pp.45-48, 2018.3



## 第 5 章

### まとめ



## 第5章 まとめ

### 5.1 本研究のまとめ

本研究では、既存木造建築物の劣化部位の材料特性評価のための非・微破壊的手法の適用性と蟻害による内部劣化に伴う木造部材の断面欠損に着目し、「部材を極力傷つけない非・微破壊による内部劣化探査および部材をできるだけ活かす補強方法の提案」を目指して研究を進めてきた。

本研究において得られた知見を以下に示す。

- 1) 縦圧縮強度の低強度域（超音波伝播速度 1500m/s 以下）においては、完全非破壊による強度推定の可能性が示唆された。中強度以上については、プローブによる引抜き抵抗試験での材料強度推定が可能である。
- 2) 補強孔をあけることによる木材の欠損状態変化と樹脂の補強効果を検証するために、圧縮力を均等に負担できるように中心に穿孔した模擬劣化試験体を対象とし、超音波法による欠陥探査ならびに縦圧縮載荷試験を行った。その結果、縦圧縮強度の明確な低下が認められた欠損割合 30%において、超音波速度の変化が認められた。また、樹脂充填を行った試験体に対しても超音波法を用いることで内部充填状況の推定が可能であることがわかった。樹脂充填によって、全ての試験体において劣化試験体よりも圧縮強度が上昇していることから、樹脂充填は劣化材の圧縮強度向上に一定の効果がみられることを示した。
- 3) 蟻害試験体を対象とした超音波法による内部劣化探査について、超音波伝播速度比と質量比、充填状況と超音波伝播速度比には高い相関が認められ、蟻害を受けた木材について、超音波伝播速度比から蟻害による劣化を質量比の観点で評価できる可能性があるものと考えられる。
- 4) 蟻害が進行した曲げ部材を想定し、樹脂充填による補強効果を曲げヤング係数および曲げ荷重の観点から評価を行った。充填の状況を超音波による表面法で評価できることが確認されたものの、曲げ耐力の向上効果は縦圧縮強度ほど顕著ではなかった。
- 5) 蟻害が進行した接合部を想定し、樹脂充填による補強効果を内部劣化への樹脂充填によるせん断強度・せん断剛性の向上が確認された。

## 5.2 材料強度推定フローの提案

本研究の成果を踏まえ、グレード4の劣化木材を一例として低強度領域における超音波伝播速度に基づく縦圧縮強度推定式（式3-1）および材料強度推定フローを図5-1に提案する。

$$F_c = 7.65 \cdot X^{2.30} \quad \dots \text{式 5-1}$$

ここで、 $F_c$ :劣化木材の縦圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

図5-1に示すように、目視診断で診断結果がグレード2以上の箇所については超音波試験を実施する。その際に、超音波伝播速度が1500m/s以下の箇所については、式3-1にて強度推定を行う。

また、1500m/sを越える箇所については、グレード0～1の箇所と合わせてプローブ引き抜き試験を行い、推定密度から強度推定を行うものとする。

更に、補強対象については、超音波伝播速度が1500m/s以下の箇所は補強対象とすることに加え、1500m/s以上の箇所については、引き抜き抵抗試験結果と公称値もしくは健全部のデータと比較し、補強の判断を行うこととする。

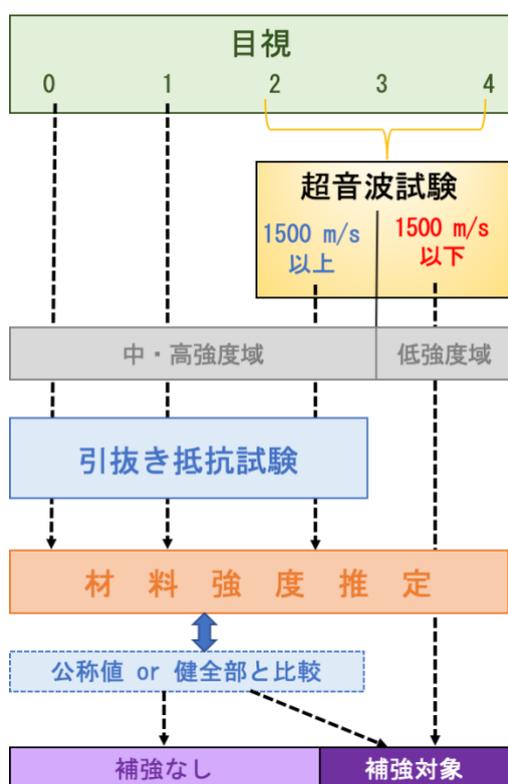


図 5-1 材料強度推定フロー

## 付録

非・微破壊的手法による既存建造物の

材料性能評価

～駒込樹林館の例～



## 付録1 非・微破壊的手法による既存建造物の材料性能評価

### ～駒込樹林館の例～

#### 1 はじめに

第5章までに非・微破壊試験による材料性能評価および樹脂充填による補強の有用性を示してきた。そこで付録では実建築物に対して今後保存・改修を行なっていくために、構成材料の耐久性の把握を目的として調査を行った。

#### 2 調査対象

東京都豊島区駒込に位置する樹林館の蔵は、1918年（大正7年）に建設された。2階建の蔵で、基礎と壁が鉄筋コンクリート造（以下、RC造）、屋根および床組は木造瓦葺の複合構造である。日本でRC造が建築に取り入れられ始めたのは明治時代後期といわれており、蔵の構造は土・組積に始まり1910年以降になると、RC造や木-RC造の複合構造の蔵が多く見られるようになったことから、樹林館の蔵はRC造を取り入れた初期の建築であるといえる。1923年の関東大震災に被災したものの大きな被害は無く、1945年の東京大空襲においては2発の焼夷弾の直撃を受け発火したものの燃焼することは無かった（写真1(b)）。現在も一部の柱や梁部分に炭化の跡が見られ修復された箇所もあるが、今もなおほとんどの部材において当時のまま現存している。本論は、今後の保存・改修に向けた本蔵の構成材料の耐久性の把握を目的として調査を行った結果を報告するものである。



(a)外観



(b)内部（1F）

写真1 調査対象写真

### 3 調査対象の構法調査

#### 3.1 構法の概要

蔵のパースを図1に、平面図を図2に示す。蔵の構造は、基礎と外壁がRC造、屋根および床組みが木造のRC-木複合構造である。RC造の外壁は厚さ70mmで、屋外は石割目地をつけた洗い出し仕上げ、屋内はモルタル仕上げが施されている。2階床付近の一部に水切りが回る。1階床は、束石の上に束をたて、根太を引き、2階床は2本の梁と壁際の根太受けに根太をかけ、床板が張られており、入り口側は建具縦枠を兼ね屋外側に、反対側は室内側に根太が突出している。

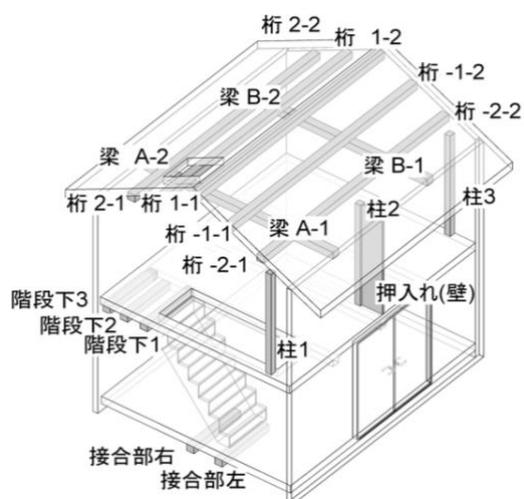


図1 パース

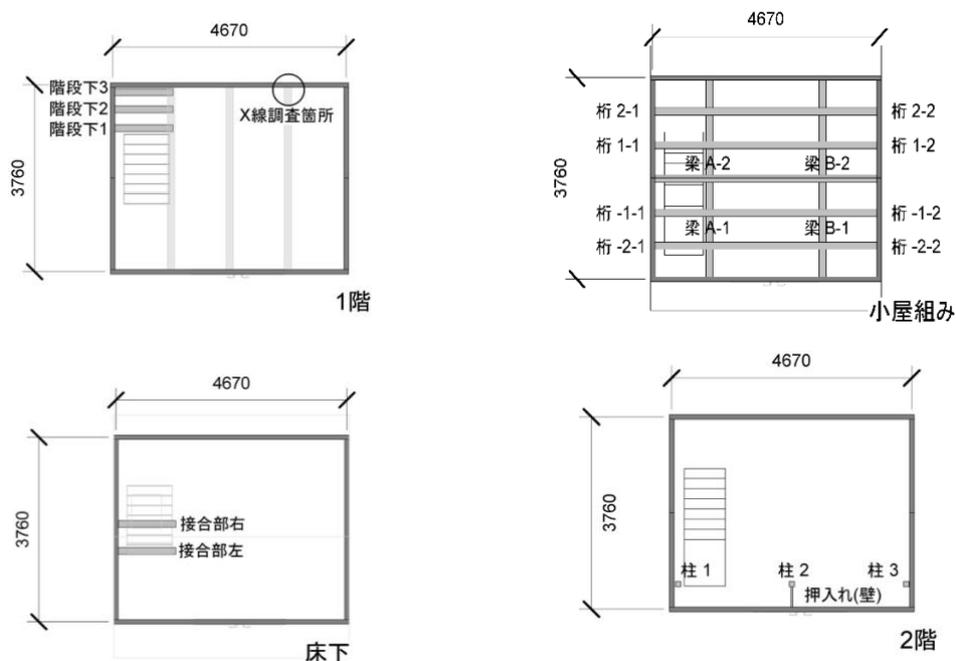


図2 平面図

### 3.2 RC 壁と木梁接合部

木梁端部と RC 壁の取り合い状況や、柱の配筋状況および床梁と柱の接合状況確認を把握するために、工業用携帯式 X 線検査装置（X 線管電圧：80～200kV）を用いて内部の状態を調査した。撮影の様子を写真 2 に示す。

調査結果における X 線の角度と像の影の深さから、図 3 に示すように、木梁は RC 壁内部へ 34mm 程度入り込んでいると考えられる。床梁下端と柱上には接合具は見られず、木梁はコンクリート壁面に直埋めされているといえる。

なお、柱および壁に図 4 に示すような孔状の空洞が確認された。RC 工事において金属製のセパレーターが普及するのは 1920 年代後半であり、それまでは竹が使用されていた<sup>1)</sup>ことから、この孔は竹のセパレーターであると推察される。



a) X 線発生器設置位置



b) X 線フィルム貼り付け位置

写真 2 X 線撮影の様子

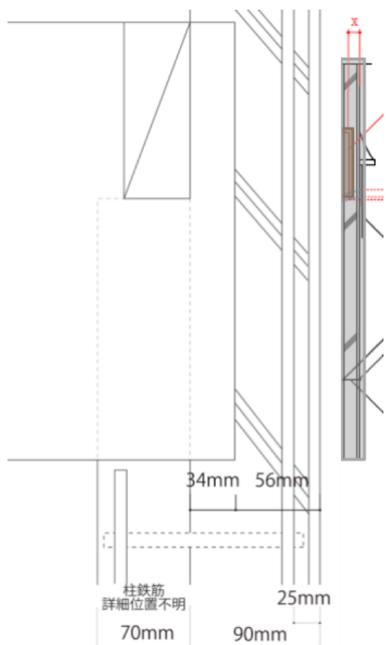


図 3 接合部詳細

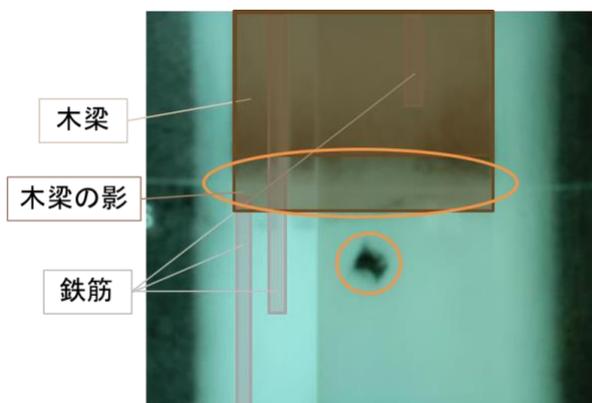


図 4 X 線写真

## 4 材料の耐久性調査

### 4.1 調査項目について

本調査における調査項目一覧を表1に示す。

表1 調査項目一覧

| 調査項目           | 調査内容  |
|----------------|---|
| 接合部調査          | ・X線調査<br>・レーダ探査機  |
| 耐久性調査<br><RC部> | ・中性化深さ測定<br>・コア供試体圧縮強度<br>・コンクリートの含水率分布<br>・鉄筋の腐食状況<br>・かぶり分布 |
| 耐久性調査<br><木材部> | ・目視<br>・含水率<br>・炭化深さ<br>・穿孔抵抗値<br>・超音波伝播速度<br>・プローブせん断試験      |

### 4.2 RC造部における調査概要

#### 4.2.1 調査概要

RC造部分についてはコア抜きにより中性化深さ、圧縮強度、かぶり分布、内部の含水状態、鉄筋の腐食状況を調査した。

#### 4.2.2 調査項目

##### (a) 中性化深さ測定

Φ60mm程度の湿式コアの採取を行い、JIS A 1152に準拠し、中性化深さの測定を行った。

##### (b) コア供試体圧縮強度

(a)の供試体に対して、石膏でキャッピングを行った後、JIS A 1107に準拠して圧縮試験を実施した。

##### (c) かぶり分布

かぶり分布の測定は電磁波レーダ法によって、外壁の南面および東面の水平方向及び鉛直方向のそれぞれについて計測した。

#### (d) コンクリートの含水率分布

鉄筋のかぶり厚さ近辺の含水率を把握するため、ドライビットにより  $\Phi 43\text{mm}$  程度の乾式コアを、雨天による内部の含水状態の変化を避けるため、2日間の晴天の続いた日に採取した。採取を行ったコア供試体の表面から約  $10\sim 20\text{mm}$  のスパンで切断し、 $105^\circ\text{C}$ 乾燥炉を用いて、下式により質量含水率を算出した。

$$m = \frac{M - M_{dry}}{M_{dry}} \times 100 \quad (1)$$

$M$  : 質量含水率(%)                       $M$  : 調査時質量(g)  
 $M_{dry}$  :  $105^\circ\text{C}$ 乾燥後絶乾質量(g)

#### (e) 鉄筋の腐食状況

鉄筋の腐食状況はコアの採取孔を用いて目視確認した。

### 4.2.3 調査結果および考察

#### a) 中性化深さ測定

中性化深さの測定を行った結果、写真3に示すように、全断面中性化していることが確認された。



※フェノールフタレイン溶液の噴霧後の状況

写真3 コア供試体

#### (b) コア供試体圧縮強度

圧縮強度試験結果より、圧縮強度は  $5.62\text{N/mm}^2$  であった。時代はやや下がり、当該建築物とは直接関係ないが、基準の例として1921年（大正9年）に制定された「市街地建築物法施工規則」（表2）と比較すると、1921年当時の許容圧縮応力度に相当する値であることが分かる。

表2 市街地建築物法施行規則(1921年当時)

| 項目  | 調合(C:S:G※) | 許容応力度[kgf/mm <sup>2</sup> ] | かぶり厚さ[m]             |
|-----|------------|-----------------------------|----------------------|
| 規定値 | 1:2:4      | 45                          | スラブ 20mm<br>柱・梁 30mm |

※C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材

#### (c) かぶり分布

かぶり厚さの分布を図5に示す。調査した鉄筋32本におけるかぶり厚さの平均値は33.3mm、標準偏差は8.99mmそして変動係数は0.27であった。これは、平松により調査された1960年代のRC造建築物の壁部材と同程度の標準偏差であった<sup>[付2]</sup>。また、先述した「市街地建築物法施行規則」1921年（大正9年）制定時のコンクリート

の規準かぶり厚さはスラブで 20mm，柱梁で 30mm となっており，外壁側の配筋は 1921 年当時の水準を概ね満たしている。

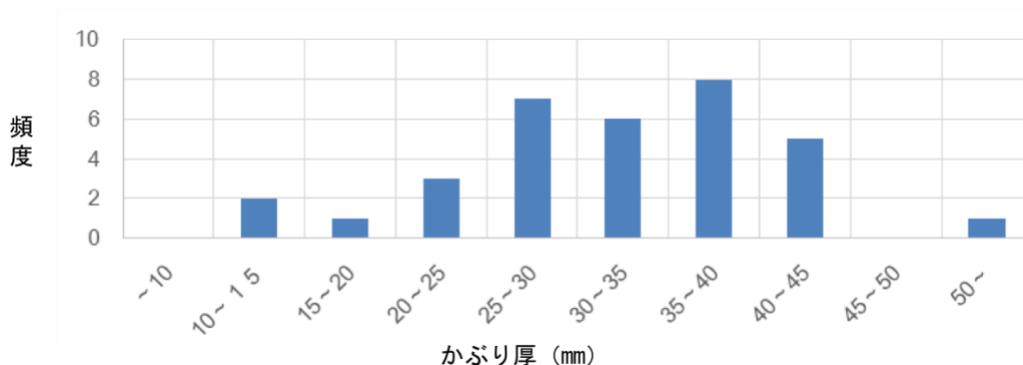


図 5 深さ別質量含水率

#### (d) コンクリートの含水率分布

コンクリートの質量含水率と筒元（外壁側）からの距離の関係を図 6 に示す。コンクリートの断面内において含水率の勾配は認められず，含水率は平均 1.7%程度と一般的なコンクリートと比較して<sup>[付 3]</sup>低い値であった。Kelvin 式においては，相関的に小さな空隙においては水分が残るということが示されているが，本コンクリートにおいては比較的粗大な空隙が支配的であったことが推察される。この点においては，今後さらに検討を進めたい。

コア供試体  
Φ48.3 × 84.3mm

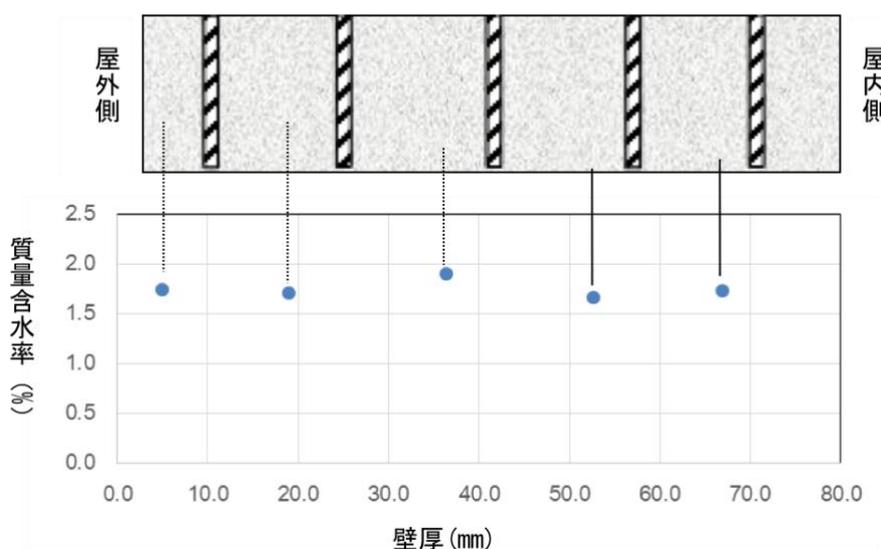


図 6 深さ別質量含水率

### (e) 鉄筋の腐食状況

コア抜き調査部の鉄筋のかぶり厚さは **36mm** であった。一般的に中性化が鉄筋まで到達した時点でコンクリートの中性化が進行し始めるといわれているが、本調査において、コンクリートの全断面において中性化しているにも関わらず、内部の鉄筋の腐食は生じていなかった（写真 4(a)）。その原因としては、鉄筋近傍の含水率が低く、鋼材の腐食に必要な環境が形成されていなかったと推察される<sup>14)</sup>。

一方でかぶり厚さが **10mm** 程度の部分では鉄筋の腐食が確認されており（写真 4(b)）、コンクリートの含水率が低い環境下において **30mm** 程度以上のかぶり厚さが確保されていれば中性化が生じていても鉄筋の腐食は生じないものと推察される。



(a)コア孔



(b)かぶり厚さ 10mm 付近

写真 4 鉄筋の状況

### 4.3 木造部における耐久性調査

#### 4.3.1 調査項目

##### (a)非破壊調査

##### (a-1)水分量調査

木材の水分による誘電率の変化を測定する高周波容量式水分計にて 1箇所につき 10回測定し、その平均を水分量とした。なお目視による腐朽状況の確認を行ったが、木材の腐朽等は確認されなかった。

##### (a-2) 超音波伝播速度測定

超音波の発信面と受信面を部材に接触させ木材内部の超音波伝播速度を測定した。本調査においては、柱・梁・桁について繊維方向に対して実施した。

##### (b) 微破壊調査－穿孔抵抗測定

木材内部の抵抗値を測定した。なお抵抗値が高いほど内部が密であると判断され、健全であると判断できる。

#### 4.3.2 調査結果および考察

##### a) 非破壊調査

##### (a-1)水分量調査

晴天と雨天日に計測を行ったが、**図7**に示すように、蔵内の部材の含水率は場所によらず 10%前後であり、一般的な平衡含水率とされる 15~16%を下回った。接合部分については、土台近くの開口部に位置することが、含水率に影響していると考えられる。

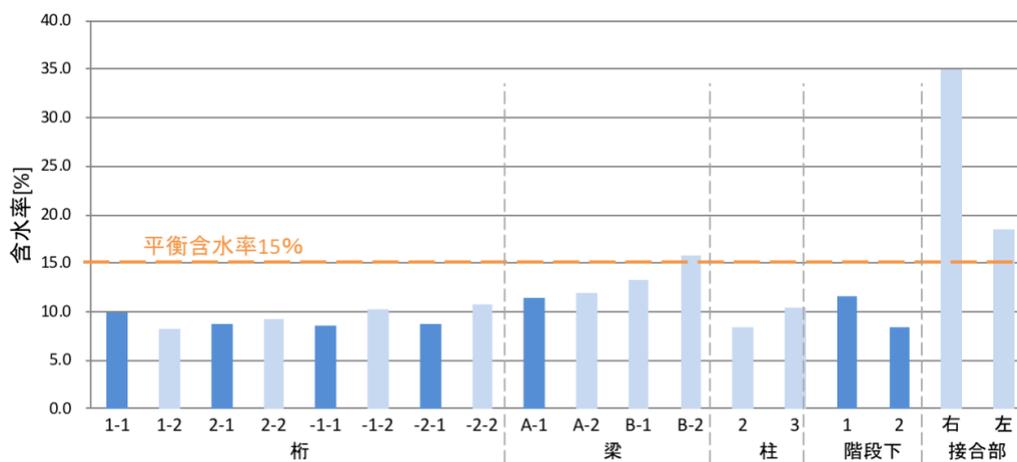


図7 各部材における含水率



## 5 火害調査

### 5.1 調査項目

火害調査については、目視・炭化深さ測定による火元の推察、微破壊調査による強度推定を行った。

#### (a)炭化深さ測定

火害調査については、デプスゲージを使用して、健全部までの炭化深さを測定する(写真5)とともに、おおよその火の流れを推察するために焼夷弾の投入口から炭化深さ計測地点までの距離を計測した。炭化した部材の例を写真6に示す。計測結果を建物の火害診断及び補修・補強方法指針・同解説に準じ、炭化深さから火災継続時間を算出した。



写真5 炭化深さ計測の様子



写真6 炭化した部材

#### (b) プローブ引抜抵抗によるせん断強度

火害が確認された場所を中心に、既往の研究<sup>[付6]、[付7]</sup>を参考に、プローブの引張強さにより木部のせん断強度を求めた。

具体的には部材の繊維直交方向に穿孔(直径 3mm)し、ドリルに取り付けたプローブを深さ 20mm・35mm の地点まで先孔にねじ込んだ後、1mm/min を目安に Figure.20 に示す携行型引張試験機を用いて引張抵抗を計測し、最大値を引抜強さとし、この引張強度の測定値から基準化引張強度(式(4))、木材密度(式(5))、繊維方向せん断強度(式(6))を求め、公称値<sup>[付8]</sup>と比較検討を行い、強度推定を行った。

$$\tau = \frac{P}{R_t \times \pi \times L_t} \quad (4)$$

$$D = 0.0032\tau + 0.1745 \quad (5)$$

$$Sh_L = 0.5128\tau + 2.3822 \quad (6)$$

$\tau$  : 基準化引張強度(N/mm<sup>2</sup>)       $P$  : 引張強さ(N)  
 $R_t$  : プローブのネジ部外径(mm)       $\pi$  : 円周率  
 $L_t$  : プローブのネジ部刃長(mm)



### (b) プローブ引抜抵抗によるせん断強度

強度推定に関しては、樹種が不明なため、材料としての最小値を検討することとした。スギ材と比較した場合、2階の桁-2を除いてせん断強度（図10）と密度ともに公称値を満たしている。

また、前述した超音波速度測定と穿孔抵抗測定の強度推定からも、一定以上の強度が保たれていることが明らかとなっており、著しく損傷した部位は無かったといえる。

すなわち、炭化以深部の材料強度は十分に高く、炭化部以外の断面積は、炭化が最も進んでいる箇所においても95%程度確保されていることを考慮すると部材は十分健全であると判断できる。

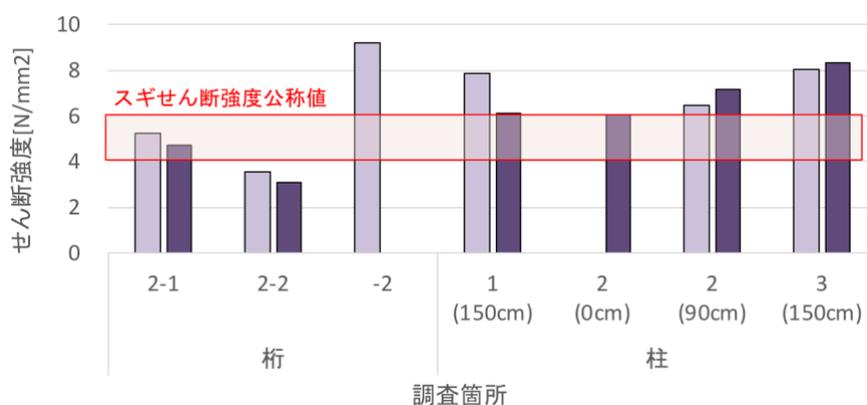


図10 各部材のせん断強度

## 6 まとめ

本報告では、築約 100 年の東京都豊島区駒込に位置する樹林館の蔵について、今後の保存・改修に向けた耐久性の把握を目的として調査を行った。本稿の結論を以下に示す。

- 1) コンクリート部材の全断面において中性化が進行していたが、かぶり厚さ 30mm 程度の鉄筋において腐食は確認されなかった。
- 2) コンクリートの圧縮強度は  $5.62\text{N/mm}^2$  であり、参考値として、当時の市街地建築物法施行規制の許容圧縮応力度程度の値であった。
- 3) 木材部については、健全部において約  $30\text{N/mm}^2$  の強度が推定され、炭化部においても 95%以上の断面が確保されていた。
- 4) 焼夷弾は小屋組みの南側と二階の西側の二箇所を火元として燃え広がった。燃焼時間は最大で 10 分程度であったと推察される。

以上、本蔵の調査により、鉄筋コンクリートについては、中性化による鉄筋腐食の条件におけるかぶり厚さ及びコンクリートの含水率の考慮の必要性を、また木材については力学特性評価における非・微破壊試験の有用性を示すことができたと考える。

## 付録1 参考文献

- [付 1] 志岐祐一：型枠，セパレーターからみた同潤会アパートメントの変遷，学術講演梗概集，F-2，建築歴史・意匠，pp.311-312，2005
- [付 2] 平松和嗣：既存 RC 建物構造体の実用的な耐久性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，2007
- [付 3] 兼松学，白石聖，庭野究，西尾悠平，今本啓一，濱崎仁，田村政道，野口貴文：同潤会上野下アパートに関する調査研究（その 3 中性化および水分状態について），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.1131-1132，2014.9
- [付 4] 古賀一八，林典男，平田延明：高濃度塩化物イオン含有 RC 建築物の含水率および鉄筋腐食調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，2008.
- [付 5] 南川貴明，大塚亜希子，今本啓一，清原千鶴：岐阜三重塔修復のための材料性能評価に関する研究，2015 年度日本建築学会関東支部研究報告集，pp.101-104，2016.3
- [付 6] 山口修由：既存木造建築物の木質部位の強度健全性診（4）—プローブの引抜抵抗を用いた現場診断法—，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），構造 III，pp.393-394，2014.9
- [付 7] Nobuyoshi Yamaguchi, “In situ Assessment Method of Wood using Normalized Withdrawal Resistances of Metric-screw Type Probes”, Advanced Materials ReseaRCh Vol.778 (2013), pp.217-224 3
- [付 8] 木材工業ハンドブック（改訂版），独立行政法人森林総合研究所，丸善，2014.3

## 謝辞

本論文は筆者が東京理科大学大学院工学研究科専攻博士後期課程在籍中に取り組んできた研究成果をまとめたものです。

本論文の執筆に際し、数多くの方々からご指導およびご協力をいただきました。

同専攻教授 今本啓一先生には指導教官として本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、丁寧にご指導を戴きました。今本先生が背中を押してくださったからこそ、未熟な筆者がここまで研究を進めることができました。ここに深謝の意を表します。

同専攻教授 伊藤裕久先生、同専攻准教授 熊谷先生、同大学国際火災科学研究科教授 河野守先生、国立研究開発法人建築研究所 山口修由氏、並びに中島昌一氏におかれましては、副査としてご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導を戴きました。ここに深謝の意を表します。

東京理科大学大学院工学研究科修了生南川貴明氏、五郎丸修平氏におかれましては、第3章では南川氏、第4章では五郎丸氏の修士研究のデータを提供いただきました。ここに感謝の意を表します。

本研究の第4章の実験については、株式会社アサンテ様、株式会社コーシンハウスケアリング様、前田工織株式会社様に試料を提供して戴くとともに有益なご助言を戴きました。ここに感謝の意を表します。実験に際しましては日本工業大学教授 那須秀行先生および那須研究室の皆様にご多大なご協力を戴くとともに有益なご助言を戴きました。ここに感謝の意を表します。

また、同専攻助教の清原千鶴先生をはじめとする本専攻 今本研究室の各位には研究遂行にあたり日頃より有益なご討論ご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

筆者の勤務先である秋田県立大学においては、同大学システム科学技術学部建築環境システム学科同専攻学科長 教授 西田哲也先生、同建築材料グループ長 教授 板垣直行先生をはじめとする大学関係の皆様方には、就労しながら学位を取得することを考慮いただき、多大なるサポートをいただきました。ここに感謝の意を表します。

また、学部4年から修士まで所属していた東京理科大学工学研究科准教授 伊藤拓海先生と学部当時助教でいらした関東学院大学准教授 神戸渡先生には、研究室や大学を超えて大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

最後に、どのような状況下においても筆者の意思を尊重し、いつも温かく見守ってくれている筆者の両親である父 和行、母 洋子に心より感謝いたします。

2019年3月  
大塚 亜希子