

## 劣化木材の非破壊性能評価手法と補修技術の検討

DB16266 原田勇輔

### 1 はじめに

木材は、古くから日本の建築物に使用されている建築材料の1つであり、人々にとって、とても身近な材料である。また、日本には森林が多く、これから先も、多くの建造物に木材が使用されていくことが予想される。実際、近年では木材の耐火性能を向上させる方法が研究されており、中型、大型の木造建築物も多く造られるようになった。その一方で、日本は高温多湿な気候であり、それらは木材を劣化させ、強度を低下させる原因となる。そのため、木材の劣化の要因である、腐朽や虫害に対しての対策を行うことが建築寿命を延ばす上で大切となる。特に、日本の文化財などの貴重な建築物は木造であることが多く、木材の劣化で大きな被害を受けるため、被害の調査や補修・補強技術を確立することがこれからの課題となる。

本研究では、試験体の超音波伝播速度から木材の虫害基準を作成し、木造文化財の被害範囲、被害の大きさを超音波検査<sup>1)</sup>する。さらに、樹脂による補修・補強技術<sup>2), 3)</sup>を検討することで、文化財建築の補修において大切な現状の部材を生かすことを目的としている。また、現在の木造建築物で使われることが多い集成材の研究も行うことで、より多くの木造建築物の建築寿命を延ばすことができると考える。

### 2 研究概要

表1には実験内容について、表2には使用材料について、表3には実験要因と水準について記す。文化財建築に用いられる木材(スギ、ヒノキ、アカマツ)や密度が大きく異なる木材<sup>4)</sup>、現在の木造建築物で多く使用される集成材を用意し、各樹種の密度、超音波伝播速度、動弾性係数の関係を様々な状態での比較から劣化状況の基準を作成する。また、それを活用した補修・補強技術を開発する過程で、今回は虫害の孔に適した粘度を注入角度や孔の大きさについて調査する。

表1 実験段階と実験内容

項目	研究内容
実験1	重要木造文化財の虫害調査(外観調査と HLD 値)
実験2	国産木材の密度(g/cm <sup>3</sup> )と貫入荷重(N)の関係
実験3	スギの質量減少(g/cm <sup>3</sup> )による超音波伝播速度(km/s)の変化
実験4	木材の樹種ごとの超音波伝播速度(km/s)
実験5	木材の超音波伝播速度(km/s)と動弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )の関係
実験6	木材状態変化の超音波伝播速度(km/s)、動弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )の変化

表2 使用材料

項目	特徴	樹種	数	寸法(縦 mm×横 mm×長さ mm)	
				縦材	横材
実験1	針葉樹	スギ・ヒノキ・ネズコ・トウヒ・マツ・イチイ・モミ・サワラ	各1	5.5×24.5×59.5	—
	広葉樹	ホオ・クス・ツバキ・ツゲ・タモ・ウルシ・カシ・キリ・ケヤキ・カバ・サクラ・クワ・カツラ・クリ・セン・エンジュ・トチ・ナラ・シナ・ブナ	各1	5.5×24.5×59.5	—
実験3	針葉樹	スギ	1	50×50×50	—
		スギ型枠用合板	6	100×100×12	—
実験4 5 6	無垢材	クリ	各6	54×54×100	54×54×100
		アカマツ			
		ヒノキ			
		スギ			
	集成材	スギ	各6	54×54×100	54×54×100
		アカマツ			

表3 実験要因と水準

項目	要因	水準
実験1	衝撃弾性波速度比(HLD 値 最大 1000)	柱の測定高さ、柱の方位による比較
	測定高さ(cm)	部位の床からの高さによる比較
実験2	密度(g/cm <sup>3</sup> )	樹種による比較
	貫入荷重(N)	密度による比較
実験3	密度(g/cm <sup>3</sup> )	孔空け前後による比較
	測定方向	縦材/横材
	超音波伝播速度(km/s)	孔空け前後による比較
実験4	密度(g/cm <sup>3</sup> )	樹種による比較
	測定方向	縦材/横材
	超音波伝播速度(km/s)	樹種、密度による比較
実験5	超音波伝播速度(km/s)	樹種、密度による比較
	測定方向	縦材/横材
	動弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	一次共鳴振動数による推定値 樹種、超音波伝播速度による比較
実験6	密度(g/cm <sup>3</sup> )	樹種による比較
	測定方向	縦材/横材
	使用部分	辺材/心材
	節の影響	有無、大きさ、数
	孔空による密度減少(g/cm <sup>3</sup> )	元の健全な木材と比較
	含水率(%)	水分量
	超音波伝播速度(km/s)	上記の状態と通常時の比較
	動弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	上記の状態と通常時の比較

### 3 劣化木材の補修方法検討における基礎的物性調査

#### 3.1 木造重要文化財の虫害調査

木造重要文化財の虫害による劣化はどの部分が激しいか、調べることを目的としている。岐阜県の木造重要文化財に現地調査に行き、衝撃弾性波速度比試験器(HLD 値)を使い、衝撃弾性波速度比による虫害状況の調査を行った。図 1 から地面に近い部材ほど、衝撃弾性波速度比の下限値が低いことを確認した。

#### 3.2 木材の密度と表面強度の関係

木材の密度と表面強度の関係を針葉樹 8 種、広葉樹 20 種の合計 28 種類の国産材を使い相関関係について調査した。図 2 の結果から木材全体では密度と表面強度の相関係数が 0.9547、針葉樹では相関係数が 0.9034、広葉樹では 0.95 と高い値が観測された。このことから、強度と密度には強い相関関係があることが分かる。

#### 3.3 超音波伝播速度と質量減少の関係

虫害の模擬試験として、木材にドリルで孔を段階的に空け、質量減少と超音波伝播速度の関係がどのように変化するか調査した。図 3 に結果を示す。合板試験体では厚さが 12mm 程度しかなかったためか、質量を減少させても超音波伝播速度に大きな変化はなかった。立方体試験体では厚さが 50mm あったため、質量減少に伴い、超音波伝播速度に大きな変化があった。このことからある程度の距離がなければ正しく測定できないということが分かった。相関係数に関してもすべて 0.95 を超える高い相関関係を示している。また、今回の結果から、木材は縦方向か横方向によって超音波伝播速度が大きく異なるということを確認した。縦材の方が横材よりも超音波伝播速度が 2 倍以上速く、同じ横材でも測定方向により大きな差があった。この理由として木材の繊維方向や、秋材と春材の密度の違いが超音波伝播速度に影響を及ぼしたと考えられる。

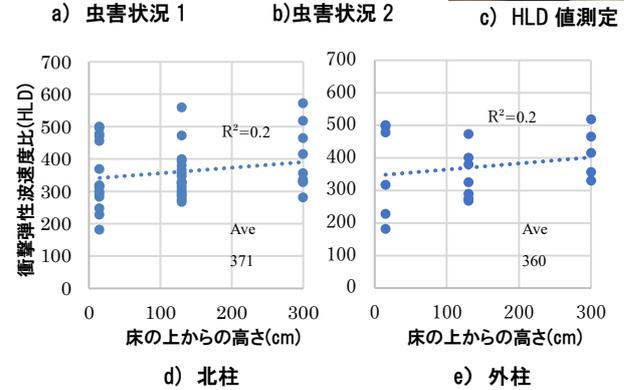
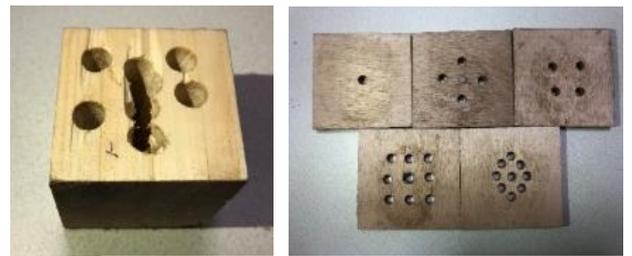


図 1 木造重要文化財の柱の床の上からの高さと同表面強度の関係



a) スギ(50×50×100mm) b) スギ合板(100×100×12mm)

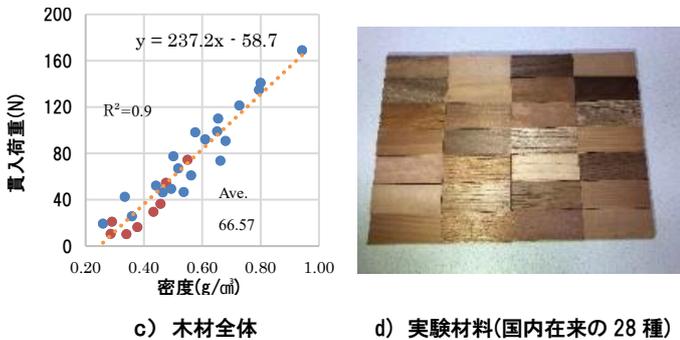
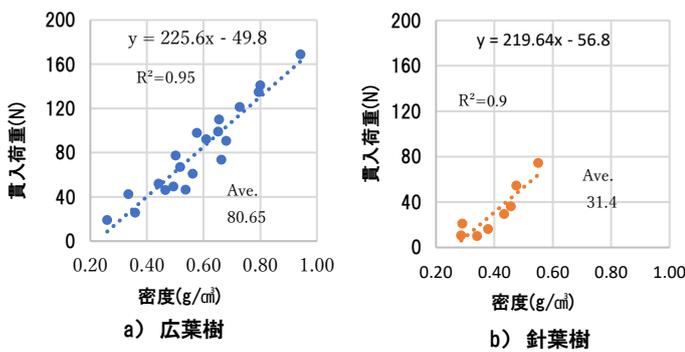


図 2 木材の密度と強度の関係

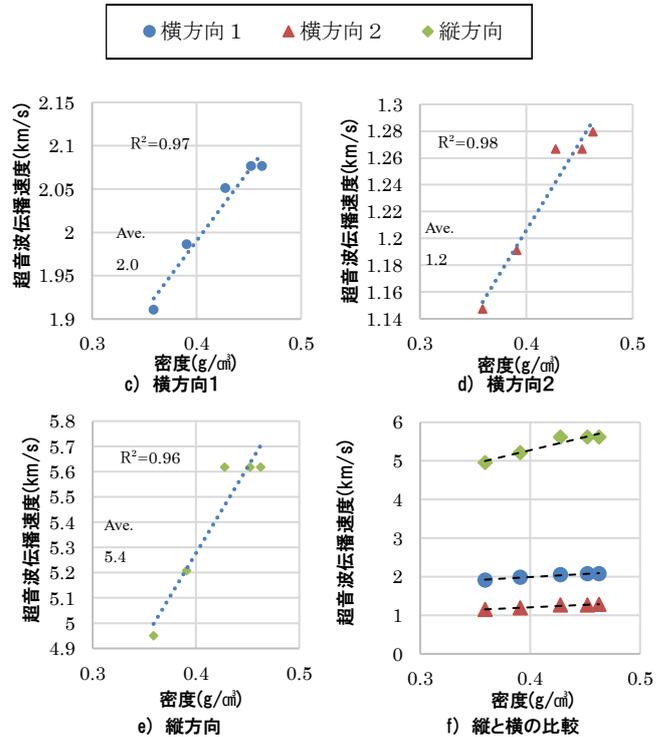


図 3 密度と超音波伝播速度の関係

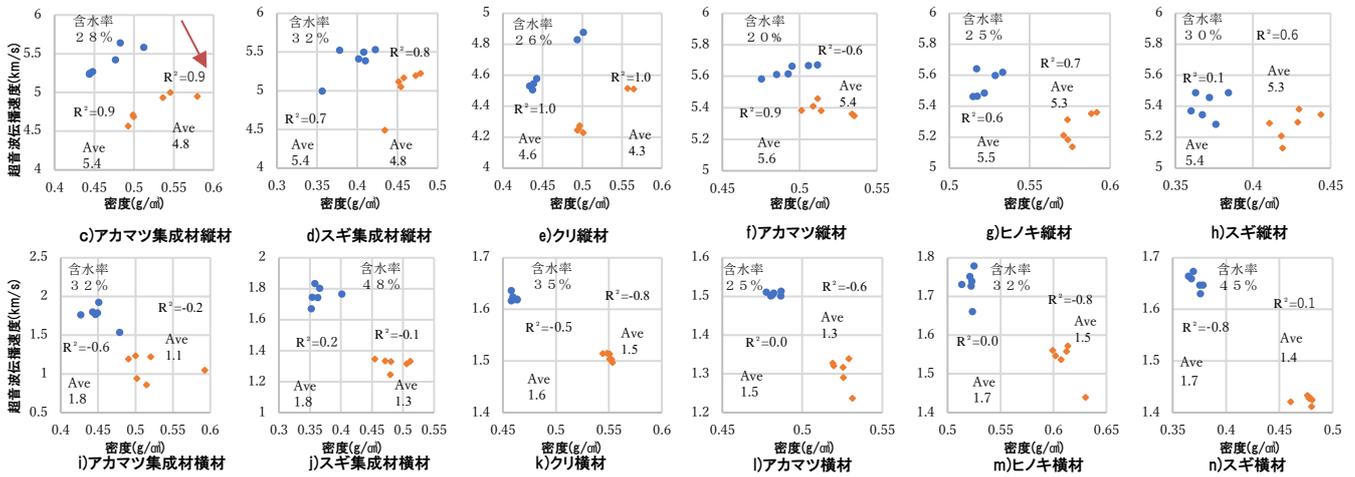


図4 含水時と通常時の超音波伝播速度の関係(樹種別) 【●通常時 ●含水時】

#### 4 各種木材の非破壊による性能評価手法の検討

##### 4.1 含水時と通常時の超音波伝播速度の比較

表3の木材を水に36時間浸け、含水状態にした。その後、含水率が変化する前後の密度と超音波伝播速度の関係を表した。青色は通常時、橙色は含水時となっている。図4の同じ樹種の場合、縦材の超音波伝播速度は密度に比例している数が多く、高い相関係数を示したが、横材の場合は密度と超音波伝播速度に相関関係は見られなかった。すべての樹種の縦材と横材の超音波伝播速度を比べると、通常時より含水時の方が値を下回った。この結果から、木材の含水率が変化すると、超音波伝播速度に影響を及ぼすことが分かった。超音波による検査を行う際は含水率による補正も考慮する必要があると推測できる。また、図5の木材全体で見た場合は、通常時と含水時の密度と超音波伝播速度の関係の相関係数に大きな差がなく、縦材と横材の平均超音波伝播速度の差も同程度となった。さらに、縦材よりも横材の方が吸水率の値が大きく、超音波伝播速度の減少率も大きいことが分かった。横材の密度と超音波伝播速度の関係は通常時、含水時共に高い相関関係を示した。

##### 4.2 含水時と通常時の超音波伝播速度と動弾性係数の関係

3.1の実験と同じく、木材を水に36時間浸け、含水状態にした。木材内の含水率が変化した時の密度と超音波伝播速度の関係を表した。橙色は通常時、青色は含水時となっている。

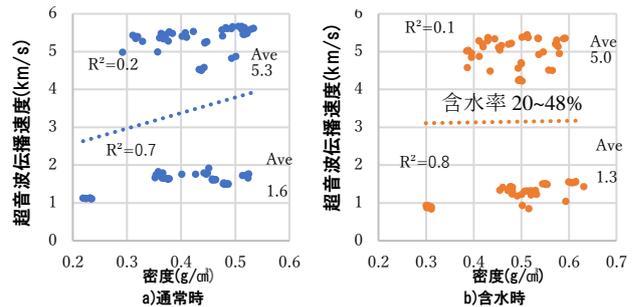


図5 含水時と通常時の超音波伝播速度の関係(全体)

図6の樹種ごとの結果を見ると、横材は縦材と比べて非常に低い値となった。また、同じ樹種でも無垢材の方が集成材よりも動弾性係数が2倍程度高くなった。木材全体で超音波伝播速度と動弾性係数の相関係数を比較した場合は縦材より横材の方が相関係数の値が高くなった。さらに、縦材と横材をまとめると0.8という高い相関係数となった。図7のすべての樹種の縦材と横材を見ると、概ね含水時の方が通常時の値を下回った。この結果から木材の含水率が変化すると、動弾性係数に影響を及ぼすことを確認した。木材全体で見た場合は通常時と含水時の超音波伝播速度と動弾性係数の関係の相関係数に大きな差がなく、縦材と横材の平均動弾性係数の差も同程度になった。さらに、横材の超音波伝播速度と動弾性係数の関係は通常時、含水時共に高い相関関係を示した。

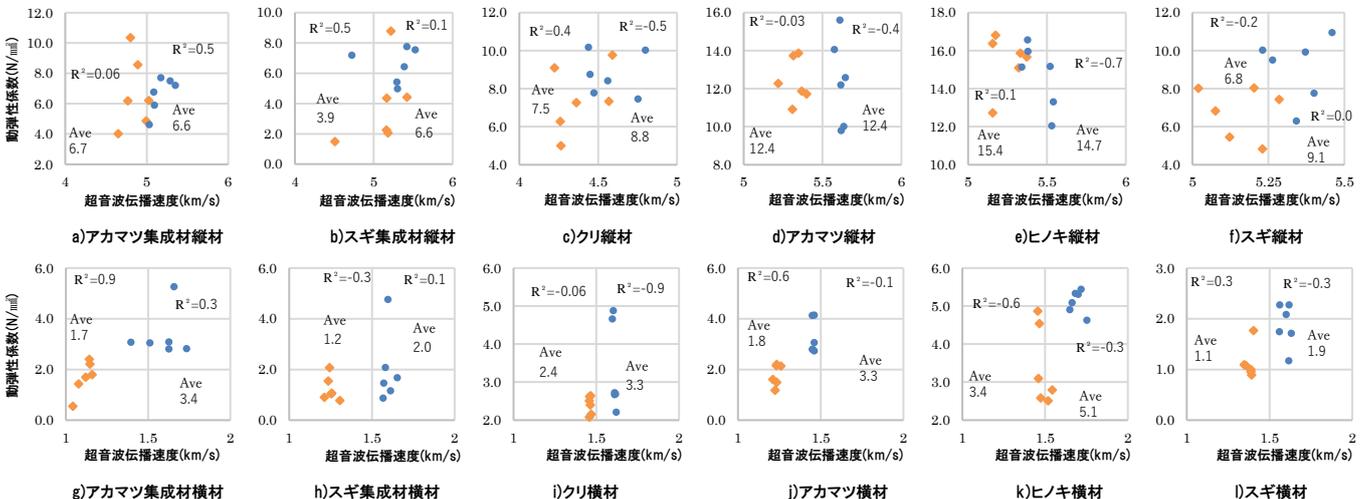


図6 通常時・含水時の超音波伝播速度と動弾性係数の関係(樹種別) 【●通常時 ●含水時】

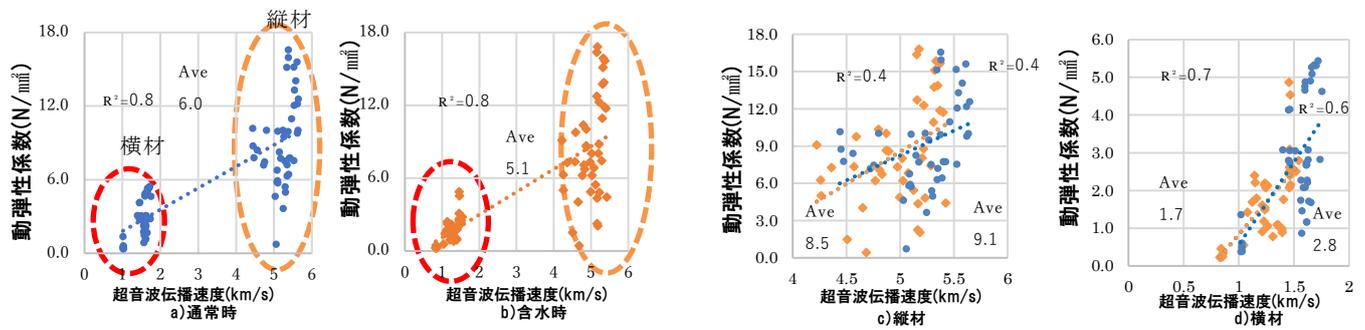


図7 通常時・含水時の超音波伝播速度と動弾性係数の関係(全体)

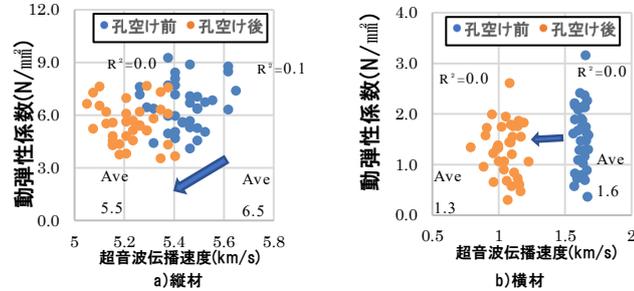


図8 孔空け前後の超音波伝播速度と動弾性係数

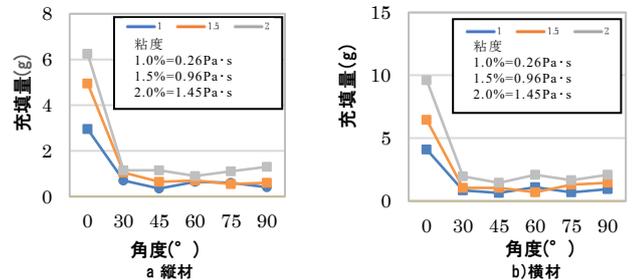


図9 10mm孔の模擬補修剤充填量

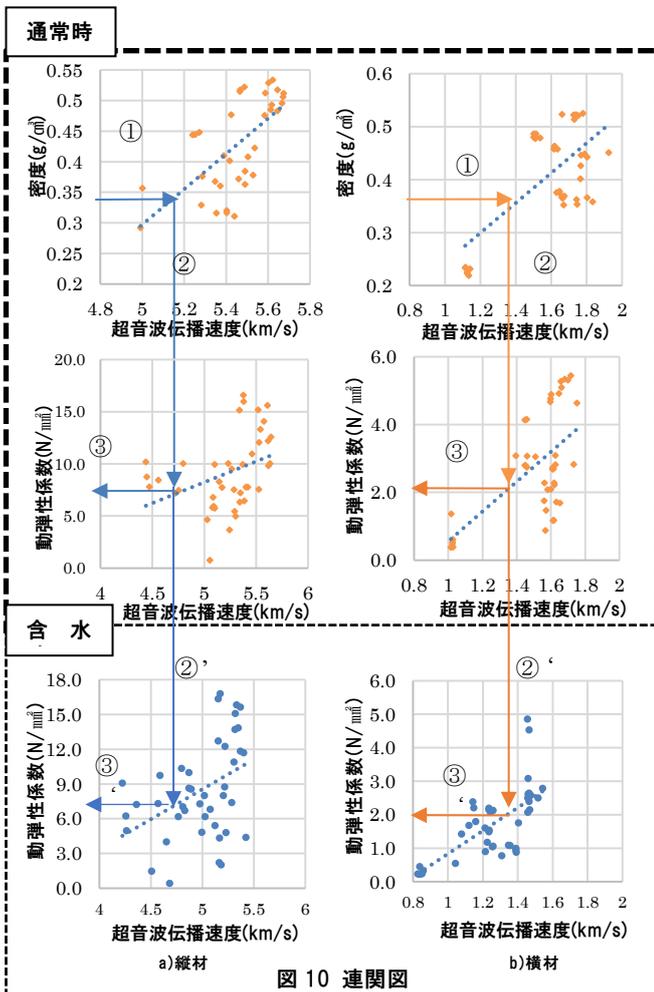


図10 連関図

### 4.3 模擬補修材の充填量、孔空け前後の性能変化

虫害の孔に補修材を注入する際の適切な粘度の調査を行う。スギの54mm×54mm×100mmの試験体に直径10mmの模擬虫害の孔を開け、その孔に補修材を模した3種類の粘性液体を注入した。模擬補修材は水にメチセルロースを1.0%、1.5%、2.0%の割合で調合したもので、注入は0°30°45°60°75°90°の6つの角度で行った。その後、注入前後の質量から充填量を求めた。また、孔空け前後の超音波伝播速度と動弾性係数を比較し、孔空けによる影響を調査した。図9を見ると、粘性が高い液体の方が充填量は高く、基本的に角度が大きくなればなるほど、充填量は低下している。さらに、角度が0°から30°になると、充填量が大きく減少した。このことから、注入の角度と孔の大きさによって粘度を変える必要があると推測できる。また、図8の結果から孔空けによる質量減少によって縦材では動弾性係数、横材では超音波伝播速度が大きく低下することを確認した。

### 5 木材の非破壊性能評価の連関図

密度、超音波伝播速度、動弾性係数の関係から連関図を作成し、虫害状況の基準とする。これは超音波伝播速度から相対的な動弾性係数が分かることで力学的な性質を推定することを目的としている。今後は孔空けによる質量減少の影響をつなげ、正確なデータを作成する。

### 6 まとめ

- 1) 虫害による強度低下は地面からの高さが低いと大きい。
- 2) 密度と表面強度は針葉樹、広葉樹共に相関係数が高い。
- 3) 木材の超音波伝播速度は樹種ごとでは縦材、木材全体では横材が高い相関関係を示し、横材は縦材と比べ超音波伝播速度が1/2以下となった。また、含水率の上昇により超音波伝播速度が低下した。
- 4) 動弾性係数は木材全体で見た際に高い相関関係が見られた。数値は縦材では横材より3倍以上大きく、縦材の集成材は縦材の無垢材に比べ2/3程度の値となった。
- 5) 木材の模擬虫害の試験体で、縦材では動弾性係数、横材では超音波伝播速度が大きく低下している。
- 6) 樹脂の粘度は注入角度によって変化が必要だと考える。
- 7) 虫害被害を超音波検査することで力学的な性質を推定することが可能である。

### 参考文献

- 1) 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, 京都大学木材研究所報告(34), 1965,
- 2) 澤田将光: 蟻害劣化を受けた各部材に対する樹脂充填による補強効果に関する基礎的研究, 日本建築学会関東支部研究報告集(89), 2019
- 3) 大塚ほか: 蟻害により内部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に向けた基礎的検討, 日本建築学会構造系論文集, 2019.3
- 4) 小沢春江ほか: 木材の超音波伝搬特性, USE 講演予稿, 8(0)1987