応力波伝播法に基づく木材の完全非破壊型ヤング係数推定法の提案

YOUNG'S MODULUS ESTIMATION OF TIMBER BY NON-DESTRUCTIVE TEST
BASED ON STRESS WAVE VELOCITY MEASUREMENT

浪江和隆*, 焦 鍵**, 杉野未奈*, 多幾山法子***, 林 康裕****

Kazutaka NAMIE, Jian JIAO, Mina SUGINO,
Noriko TAKIYAMA and Yasuhiro HAYASHI

In order to conduct Non - Destructive stress wave velocity measurement for Young's modulus on existing wooden buildings, we improved the conventional test by comparative studying other material test methods, designing an assistant device for the test, proposing corresponding operating method and calculating method for Young's modulus. Besides, the effectiveness common used corrective value has been doubted, and result of improved the test has been verified. Young's modulus could be obtained by changing distance between sensors without using corrective data.

Keywords: Traditional Wooden Buildings, Young's Modulus, Stress Wave Velocity Measurement, Non-Destructive Test

伝統木造建物, ヤング係数, 応力波伝播法, 非破壊試験

1. はじめに

近年多発する地震により、木造建物の倒壊やそれに伴う人的被害が報告されている¹⁾。一方で、我国には伝統的な木造建物が多く立ち並ぶ地域が存在し、建物の地域特色や街並みを維持、保全しようという活動が全国各地で行われている。そのため、地震時における木造建物の安全性を評価することは非常に重要であると考えられる。

既存の木造建物の耐震性能を評価するには、建物の復元力特性を把握することが重要である。そのためには主要な構造部材の材料強度とヤング係数が必要であるが、それらは樹種により大きく異なることが知られている。現在、木材のヤング係数の指標には、木質構造設計基準・同解説²⁾等が引用されることが多い。しかし、同一樹種の木材でも、生育環境の違いから、材料特性にばらつきが生じる。また、木材は劣化とともに、含水率や曲げ耐力などの材料特性に変化が生じることが知られており、築年数の古い木造建物では、その特徴が表れやすいと考えられる。そこで、既存木造建物の現状を評価するためには、既存建物で用いられている部材のヤング係数を推定する必要がある。

木材のヤング係数推定手法には、負荷法や打撃音法、超音波伝播法、応力波伝播法等がある。負荷法は3点曲げ試験のように部材に対して実施する破壊試験であるため、既存建物においては適用できない。打撃音法は材中を伝播した縦振動の基本振動数と密度からヤング係数を求める非破壊試験である³⁻⁷⁾が、部材の木口面を直接打撃する手法であり、切断面の露出した部材が対象となるため、既存建物では実施できない。また、超音波伝播法は、入出力2種センサを

任意の間隔で木材に接触させ、その距離を超音波が伝播する時間を計測し、これと密度を用いてヤング係数を求める非破壊試験である⁸⁾。所要時間も短く取り扱いも簡易であり、センサ間距離が短い場合には効果的な手法であるが、超音波は減衰が大きいので、柱材のように長スパンの材に対してセンサ間距離を広く確保した場合は正確性に欠ける。一方、超音波伝播法と同様の考え方をを用いた試験法として応力波伝播法がある⁷⁻¹²⁾。超音波の代わりに応力波を用い、その伝播する時間（以降、応力波伝播時間と呼ぶ。）を計測する。超音波伝播法とは異なり、先の尖ったピン形状をした入出力2種センサを木材に打ち込んで使用する。部材に傷を付ける半破壊検査であるため、既存建物に対しては適用し難い欠点がある。しかし、短スパン材より長スパン材に対して試験を実施する方が計測精度が高い点や計測機器の取り扱いが簡易であること、また、短時間で実施可能であることなどが長所である。

以上を踏まえ、本論では、応力波伝播法に着目する。応力波伝播法には、センサ間距離を短くするにつれて計測誤差が大きくなることや実建物への適用が困難であることなどの問題点がある。これらの問題点を回避するため、完全非破壊で実施可能な計測用治具の製作と計測法の提示、ヤング係数推定法を提案する。まず、既往の応力波伝播法を用いた試験を実施し、計測誤差が生じる諸因を明らかにする。次に、計測用治具を提案するとともに、いくつかの試験結果に基づき、完全非破壊試験を実現させるための計測法をマニュアル化する。最後に、提案計測法を用い、前述の問題点を回避可能なヤング係数の推定法を提案する。

本稿は文献15), 16)を再構成し、加筆・修正したものである。

* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 博士課程

*** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
助教・博士(工学)

**** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.

Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., M. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

2. 既往の応力波伝播法の問題点

本章では、既往の応力波伝播法における伝播時間計測法、及びヤング係数の推定法を示す。さらに、既存木造建物に適用する際に生じる問題点について検討する。

2.1 既往の計測法

既往の計測法を図1(a)に示す。まず、応力波測定器の発信側と受信側のピン状のセンサ2つを木材に挿し込む。センサは2000mmの間隔を開け、斜め45度方向に向かい合わせに挿入する。100gのテストハンマーを用いて入力側センサのヘッドを打撃すると、出力側センサが応力波を受信し、その間の応力波伝播時間を計測する。

2.2 既往のヤング係数推定法

応力波伝播法は、木材中の応力波伝播速度 V_p と密度 ρ を用いて、式(1)のようにヤング係数 E_s を推定する手法である。

$$E_s = \rho \cdot V_p^2 \quad (1)$$

また、応力波伝播速度 V_p は、センサ間距離 L を伝播時間 $(T-\alpha)$ で除し、式(2)より算出される。

$$V_p = L / (T - \alpha) \quad (2)$$

ここで、 α は計測された応力波伝播時間に生じる誤差を補正する値であるが、測定器ごとに異なっており、本測定器の補正値は $\alpha=6.6(\mu s)$ である¹³⁾。図1(a)右のグラフに示すように、センサ間距離と応力波伝播時間は正比例の関係にあり、補正値 α は切片に対応する。

応力波伝播法より得られたヤング係数 E_s の推定精度を検証するため、JIS Z 2101を参考にした3点曲げ試験と打撃音法試験を行い、得られたヤング係数 E 、 E_t との相関を確認した。打撃音法では、図1(b)のように木材の木口面をハンマーで打撃し、材中を伝播した縦振動の固有振動数をFFTアナライザーでスペクトル解析し、基本振動数を求める。各々の試験から推定されたヤング係数を比較し、図2(a)、図3(a)に示す。また、回帰直線(式(3)、(4))も併せて掲載する。なお、 R は相関定数である。

$$E_s = 1.26E - 1.7 \quad (3)$$

$$E_s = 0.78E_t + 2.7 \quad (4)$$

これより、応力波伝播法から得られたヤング係数は曲げ試験や打撃音法から推定されるヤング係数と高い相関があると確認できる。

2.3 問題点

既往の応力波伝播法には、以下の2つの問題点が挙げられる。

- 応力波伝播法は完全非破壊試験ではないため、既存の木造家屋での使用は困難である
- センサ間距離が短い場合、ヤング係数の推定精度が低い

図1 ヤング係数を推定する検査手法

上記a)については、第3章において新しい計測法を提案する。本節では、b)について検討するため、いくつかの試験を実施する。

試験体詳細を表1に示す。既往の計測法に基づき、ヒノキ試験体2,3に対してセンサ間距離 L を変化させた試験を実施し、試験結果を図4に示す。参考のため、曲げ試験より得られたヤング係数を式(3)より変換した値も図4(b)に併せて示す。図4(a)より、応力波伝播時間 T は L と正比例の関係にあるが、その切片に対応する補正値が実際には6.6より大きい。これに起因し、式(2)を用いてヤング係数を推定すると、図4(b)のように、 L を短くするに従い推定値も小さくなる。

既往の計測法ではセンサ間距離 $L=2000\text{mm}$ と指定されており、計測精度も高いが、家屋には垂壁や差鴨居などがあり、 $L=2000\text{mm}$ の確保が困難である場合が多い。そこで、センサ間距離によらずヤング係数の推定精度が低下しない推定法が必要である。なお、本論文は、実験室実験に基づくため、密度は正確に算出できており、応力波伝播速度の精度向上を課題とするものである。

3. 非破壊型計測法の提案

前章で挙げた問題点を踏まえ、本章では完全非破壊での実施を可

図2 曲げ試験と応力波伝播法から得られたヤング係数比較

図3 打撃音法と応力波伝播法から得られたヤング係数比較

図4 センサ間距離と各値の比較

能とする計測用治具を提案し、安定した応力波伝播時間が得られる計測手法を構築するための試験を行う。

3.1 非破壊型の計測法

3.1.1 計測用治具の提案

既往の計測法は、センサを木材に挿入する必要があるため、木材に傷を付けてしまうことが欠点である。そこで、材を直接傷付けないため、写真1のような計測用治具と当て木と呼ばれる木板を製作した。図5のように、センサを挿した当て木を木材に接触させ、計測用治具で挟み締めつける。計測用治具は、スギで製作した105×45×300(mm)の木板2枚に、蝶ナット付きM12全ねじ鋼棒2本を通したものである。なお、当て木の繊維方向は木材に平行とする。

3.1.2 試験概要

提案した計測用治具を用いた試験を実施し、応力波伝播時間の計測誤差が可能な限り小さくなる計測法を決定する。なお、既往の使用法に即し、100gのテストハンマーを用い、打撃強さの安定化を図るため、ヘッドを自由落下させることを基本とする(写真2)。

当て木寸法は30×120× x (mm)($x=67.5, 105, 150$)とする。また、試験体断面寸法を表1に示す。スギ、ケヤキ、シラカシ、ヒノキ、アカマツの計5種15試験体を対象とし、当て木はスギ、ケヤキ、シラカシとし、密度にばらつきを与えた¹⁴⁾。試験体の密度、含水率、ヤング係数(打撃音法、3点曲げ試験、応力波伝播法)を表1に示す。

3.2 試験ケース

検討においては、図6に示すように、センサ間距離 L (mm)、ハンマー落下高さ h (mm)、センサ打込角度 θ (度)、当て木長さ x (mm)、センサ埋め込み深さ d (mm)、蝶ナットの締め付け力 P (N)をパラメータとする。なお、センサ間距離 L は、受信側センサを固定し、発信側センサの位置を調節して行う。また、締め付け力 P は全ネジ鋼棒2本に貼付した歪ゲージ(写真3)の値より算出する。

図7に示す4形式の試験を実施する。試験形式の名称は、材にセ

ンサを直接挿し込む形式をD(Destructive test)、当て木に挿し込む形式をN(Non-destructive test)とし、後ろの数字はセンサ打込角度 θ を表している。1計測あたりの打撃回数は10回とする。それらの平均値から誤差3%以上の値を省き、追加計測を行い、修正した平均値を計測値 T とする。なお、既往の計測法は試験D45($L=2000$ mm)である。

3.3 試験結果

本節では、前節で示した各パラメータに対する検討結果を述べる。

(a) センサ打込角度(試験D0,D45,N0,N45)

ヒノキ7試験体を用いて、試験D0, D45, N0, N45を実施し、センサ間距離 L と式(2)を用いて推定した応力波伝播速度 V_p の変化を比較し、図8に示す。なお、ここでは当て木としてスギを用いる。

センサ間距離 $L=2000$ mmとして実施した試験D0の計測値を理想値とし、●と太実線で示している。試験形式を問わず、 L が短くなるほど理想値より遠ざかる。また、当て木を用いない場合が最も理想値に近いが、当て木を用いた場合は、試験N45よりN0の方が理想値に

図5 提案する応力波伝播時間計測法(試験N45)

図6 試験のパラメータ

図7 試験形式

樹種	番号	柱断面 (mm)	密度 (t/m ³)	ヤング係数(kN/mm ²)			含水率 (%)	試験形式			
				打撃音法	曲げ試験	応力波伝播法		N0	N45	D0	D45
スギ	1	120x120	0.406	9.10	-	8.88	10.0	○	-	○	○
	2	105x105	0.357	6.03	-	7.03	12.3	○	-	-	○
	3	105x105	0.406	7.97	-	8.39	16.3	○	-	-	○
ヒノキ	1	120x120	0.549	11.47	-	11.32	6.3	○	-	○	○
	2	120x120	0.553	15.90	12.46	17.08	19.7	○	-	-	○
	3	120x120	0.519	12.61	9.77	14.38	15.8	○	-	-	○
	4	140x140	0.601	11.70	-	14.73	-	○	-	-	○
	5	140x140	0.553	12.44	-	13.68	-	○	-	-	○
	6	140x140	0.490	11.03	-	11.89	-	○	-	-	○
	7	140x140	0.465	-	-	13.73	15.5	○	○	○	○
	8	140x150	0.479	10.26	-	11.35	14.2	○	-	-	○
	9	120x120	0.476	10.60	-	12.14	16.3	○	-	-	○
ケヤキ	1	120x120	0.720	11.20	-	13.59	17.2	○	-	○	○
シラカシ	1	120x120	0.973	13.04	-	15.79	22.6	○	-	○	○
アカマツ	1	120x180	0.476	8.91	-	10.18	12.3	○	-	-	○

写真1 計測用治具

(a) 実験の様子

(b) 実測調査

写真3 ひずみゲージ

図8 各試験形式の計測値(ヒノキ7)

近い。さらに、試験N45では、打撃回数が増えるとセンサがめり込み、試験体を傷付ける可能性や、センサ打込角度にばらつきが生じる可能性がある。そこで、本論では試験N0を採用する。

(b) 当て木の長さxと樹種(試験N0)

試験N0を実施し、当て木長さ x や樹種を変化させ、センサ間距離 $L=500, 1000, 1500, 2000\text{mm}$ とした結果と、各試験結果の回帰直線を掲載したものを図9に示す。

計測値 T はセンサ間距離 L に比例して増大するが、その勾配は当て木長さ x に影響されることが確認された。当て木をケヤキにした場合、 x によらず回帰直線の勾配が概ね一致する。当て木がスギの場合、 x によらず勾配が概ね一致するが、 $x=67.5(\text{mm})$ の場合はシラカシ試験体の計測値が他より大きく外れた。また、シラカシは乾燥収縮による変形が生じやすく、当て木とした場合は試験体と接触させ難かったことより、ばらつきが顕著であった。さらに、 $x=67.5(\text{mm})$ の場合、センサを打ち込むと割裂が生じるケースが確認された。一方、全試験の計測値は当て木の仕様に依らず標準偏差が $5(\mu\text{s})$ 以内と安定した。

以上の検討より、当て木としてはケヤキを用い、当て木長さ x は 105mm とすれば十分であることが確認された。

(c) 治具の締め付け強さと打撃強さ(試験N0)

全ネジ鋼棒の軸力 P (N)を変化させ、蝶ナットの締め付け強さを検討する。ひずみゲージによる計測値を視覚化するため、鋼棒にマーキングし、軸力 P を $0.4 \sim 1.4\text{N}$ まで変化させて、 0.2N 間隔で蝶ナットの回転角度 (degree)を計測する。また、打撃強さを統一するため、ハンマーヘッドを自由落下させるが、ハンマー落下高さ h (mm)を変化させ、安定した計測値を得られる落下高さを検討する。

表2に全ネジ鋼棒の軸力 P と蝶ナットの回転角度の実測値、図10に P と計測値 T の関係を示す。 P の増加に伴い T が減少し、 0.8N 以上(蝶ナット回転角度は $100 \sim 150$ 度)では計測値が安定した。なお、蝶ナット回転角度とは、蝶ナットと治具の木板が完全に接触するまで締めて以降の値を示している。ハンマー落下高さ h による計測値の違いは顕著に現れず、 $h=50(\text{mm})$ であれば十分である。

(d) センサ埋め込み深さ(試験N0)

図11(a)にセンサの埋め込み深さ d (mm)と計測値 T の関係を、図11(b)に打撃回数と d の関係を示す。打撃を重ねるにつれ d が増大し、 d の増大に伴い T が減少する。スギ、ケヤキ、シラカシ試験体で各々、 30mm 、 7mm 及び 5mm あたりに漸近した。そこで、センサ埋め込み深さ d を 30mm に統一する。

表2 鋼棒の軸力 P と蝶ナット回転角度

軸力 (N)	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4
蝶ナットの回転角度 (degree)	~100		100~150			
安定度	不安定		安定

図10 鋼棒の軸力 P と計測値 T の関係

(a) 打撃回数と埋め込み深さの関係

(b) 埋め込み深さと計測値の関係

図11 センサ埋め込み深さ d の検討

(e) 試験体の置き方による違い(試験D45, N0)

実建物の柱材での計測シミュレーションとして試験体を立てた状態と、実験室試験としての横たえた状態で計測した場合について、スギ1試験体を用いた試験D45、ケヤキ用いた試験D45、シラカシ用いた試験D45, N0を実施し、各々の計測値を比較する(図12)。

全試験体の全試験形式において両者の計測値が概ね一致した。これより、実建物においても支障なく計測できることが示された。

(f) センサ間距離 L

図13にセンサ間距離 L と計測値 T の関係を示す。各試験体の T と L は比例関係にあり、試験形式ごとの回帰直線の勾配はほぼ等しい。この傾向は樹種によらず確認された。さらに、試験D0, D45から得られた回帰直線はほぼ一致することが確認された。

また、ヒノキ1試験体を用い、センサ間距離 L を 500mm 以下とした計測も実施した(図13(d))。試験形式によらず、 L を 200mm まで近

図9 当て木の長さ x と樹種の影響

図12 試験体の置き方による違い

づけた場合にも計測結果は比例関係を示した。なお、試験N0では治具の大きさの都合上、 L が200mmの場合までしか実施できない。

3.4 提案計測法

3.3節(e)より治具の有無によらず、試験体の設置の仕方による計測誤差は生じないことが確認出来た。そこで、実建物の部材に対して実施する計測法を以下のようにまとめる。

- 当て木の繊維方向は試験体に平行とする。
- センサの当て木への打込角度は0度の場合を採用する (3.3節(a))。
- 当て木には $x = 105(\text{mm})$ のケヤキ、または、それと類似の性質を有する樹種を選択する (3.3節(b))。
- 蝶ナットの締め付けについては、試験体と当て木、治具の木板が完全に接触するまで蝶ナットを締めた後、さらに蝶ナットを100～150回転させる (3.3節(c))。
- センサの当て木への埋め込み深さ $d = 30(\text{mm})$ とする (3.3節(d))。
- 打撃にはヘッドが100gのテストハンマーを用い、ヘッドを高さ50mmより自由落下させ、センサを打つ (3.3節(c))。

4. ヤング係数推定法の提案

本節では、実建物の部材に対して提案計測法を実施する場合の、精度の高いヤング係数の推定法を提案する。

4.1 提案推定法

センサ間距離 L と計測値 T の関係 (図13) から得られた回帰直線の切片と勾配は、各々、補正值 α と応力波伝播速度 V_p の逆数に対応する。しかし、実際には切片が、既往の補正值 $\alpha = 6.6(\mu\text{s})$ よりも非常に大きく、既往の推定法を用いた場合、センサ間距離 L が短くなるに伴い補正值 α に起因するヤング係数の推定誤差が大きくなることは第2章に述べた。加えて、提案した治具を用いた場合には、さらに切片が大きいく。そこで、補正值 α の定め方を改める必要がある。

一方、センサ間距離 L と計測値 T は試験形式によらず比例関係に

あり、同一試験体であれば、それらの回帰直線の勾配はほぼ等しい。

以上を踏まえ、ヤング係数の推定には以下の2通りの方法が考えられる (図14)。

[方法 I] センサ間距離 L を $\beta + 200(\text{mm})$ 以上に確保出来ない場合、計測を1点のみで実施し、その計測値 T と補正值 α^* を用いて応力波伝播速度 V_p を推定する。ここで、 α^* は新しく定義する。

[方法 II] センサ間距離 L を $\beta + 200(\text{mm})$ 以上に確保出来る場合、計測を2点以上で実施し、計測値 T —センサ間距離 L 関係から得られた回帰直線の勾配を用いて応力波伝播速度 V_p を推定する。

1) L の最小値 $L_{\min}$ と最大値 $L_{\max}$ を決定し、その間の2点以上で計測を実施する。その際、受信側センサ位置は固定とし、 $L_{\min} \geq 200(\text{mm})$ 、 $L_{\max} \geq L_{\min} + \beta (\text{mm})$ として発信側センサ位置を操作する。

2) センサ間距離 L —計測値 T 関係の回帰直線を描き、その勾配の逆数を応力波伝播速度 V_p とする。または、任意の2点間の勾配を用いることも可能である。

ここで、 $\beta(\text{mm})$ とは方法IIを実施するにあたり、精度良く推定するために必要最低限のセンサ間距離であり、次節において検討する。

方法Iの補正值 α^* を検討するにあたり、密度 ρ —切片 α^* の相関を調べた (図15)。しかし、同一樹種でもばらつきが大きく、試験形式によっても値が異なることがわかる。以上より、現時点ではデータ蓄積が不十分であるため、補正值 α^* の特定は困難である。

4.2 精度検証 (方法 II)

本節では、前節で提案したヤング係数推定法のうち、方法IIを用いた精度検証を行う。

(a) 多点計測値より求めた回帰式の勾配を用いた場合

試験D45を実施した際の回帰式の勾配を用いて推定したヤング係数 E_{re} と打撃音法と3点曲げ試験より推定したヤング係数 E_t 、 E の相関を確認する (図2(b), 図3(b))。既往の推定法を用いた場合と同様に、 E_{re} と E_t は良好に対応することがわかる。

図13 センサ間距離 L と計測値 T の関係

図14 ヤング係数推定法

図15 密度と切片の関係

図 16 計測データの組合せ例

図 17 組合せと推定ヤング係数

図 18 ΔL とヤング係数推定精度

(b) 任意の 2 点間での勾配を用いた場合

ケヤキ 1 を用いてセンサ間距離 L を変化させた計測を実施し、任意の 2 点間のデータを用いたヤング係数推定精度を検討する (図 16)。点 A ($L=0\text{ mm}$) に受信側のセンサを設置し、発信側のセンサを点 B ($L=500\text{ mm}$)、点 C ($L=1000\text{ mm}$)、点 D ($L=1500\text{ mm}$)、点 E ($L=2000\text{ mm}$) に移動させて各々で計測を行う。例えば、点 AE 間での計測値 T_{AE} と点 AC 間での計測値 T_{AC} の差 ($T_{AE}-T_{AC}$) を取ると、点 CE 間での純粋な応力波伝播時間が算出される。図 16 の 6 つの組合せで算出されるヤング係数 E_{se} を比較し、試験 N0 と D45 について図 17 に示す。両者とも、ヤング係数推定値は概ね良い対応を示した。また、 L の組合せによらず、推定値は概ね近いことがわかる。

次に、ヤング係数推定精度をより高めるために確保すべきセンサ間距離 L を把握するため、ヒノキ 1, 4, 5, 6 の試験体を用いて同様の試験を実施し、 L の上下限値 $L_{\min}$ 、 $L_{\max}$ について検討する。

3.3 節(f)より、センサ間距離 L の最小値 $L_{\min}$ は 200 mm 以上とする。一方、 L の最大値 $L_{\max}$ の下限値 ($=L_{\min}+\beta$) を設定するため、任意の 2 点間の L の差 $\Delta L = L_{\max} - L_{\min}$ をパラメタとし、ヤング係数 E_{se} の推定誤差が小さくなる ΔL について検討した (図 16)。ここで、複数の試験体間で比較するため、試験 D45 を実施した際の回帰式の勾配を用いて算出したヤング係数 E_{re} で無次元化する。 $\Delta L \geq 400\text{ mm}$ 確保した場合のヤング係数の推定誤差は 10% 以内、 $\Delta L \geq 800\text{ mm}$ の場合は 5% 以内に収まる。ヤング係数推定精度を高めるには、 ΔL を出来るだけ長く確保すれば良いことがわかる。以上より、 $\beta = 800(\text{mm})$ と考える。

5. まとめ

本研究では、既存の伝統木造建物の部材のヤング係数を推定するため、応力波伝播法を応用した完全非破壊型の試験法を提案した。まず、簡易に自作可能な計測治具を提案し、部材にピンを挿さなければならない既往の応力波測定器の使用方法を改良し、完全非破壊での計測法を提示した。次に、既往のヤング係数推定法から生じる問題点を回避可能な推定法を提案した。最後に、提案した計測法と推定法を用いた精度検証を行った。

得られた知見を以下に示す。

- 1) 提案計測法を用いると、既往の計測法を用いた場合と同様に、安定した応力波伝播時間が得られることを確認した。
- 2) 既往の応力波伝播法において測定器ごとに与えられている補正值 ($\alpha=6.6$) は、同一樹種であっても大きく異なる可能性があり、ヤング係数推定精度を十分に保つためには、センサ間距離を 2000 mm 程度以上と長く取る必要があるため、実用的でない。しかし、補正值を用いなくとも、センサ間距離 L を変えて複数回の試験を実施することで、精度良くヤング係数を推定可能であるとわかった。

今後は、応力波伝播時間のみでなく、ヤング係数の算出に必要なとなる密度のばらつきに関する検討、また、曲げ強度に関する検討を行い、実建物の復元力を推定できる手法へと発展させたい。

謝辞

本実験の応力波測定器には FAKOPP™: ハンガリー国アルナス製の *Microsecond Timer* を使用した。また、実験の遂行にあたり、京都大学大学院工学研究科建築学専攻・建築保全再生学講座の大学院生の皆様には多大なご協力を頂いた。ここに記して、深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 植本敏大, 河合直人, 中川貴文, 村上智徳, 鈴木修治, 山口修由, 杉本健一: 平成19年能登半島地震による木造建築物の被害概況, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp.5-6, 2007.8
- 2) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—, 2009
- 3) 秦正徳, 中谷浩, 大倉幹順: 木造住宅の構造用木材の非破壊検査に関する研究, 高岡短期大学紀要, 第10巻, 1997.10
- 4) 川上和貴, 岩井哲: 打撃音法を用いた木材の弾性係数の非破壊検査測定精度の調査, 広島工業大学紀要研究編, 第42巻, pp.199-206, 2008
- 5) 川上和貴, 岩井哲: 非破壊打撃音法を用いた木材部位別の弾性係数の予測精度, 広島工業大学紀要研究編, 第43巻, pp.265-270, 2009
- 6) 祖父江信夫, 水上清志: 実大構造用木材のヤング係数予測因子としての縦共振固有振動数, 材料, 社団法人日本材料学会, Vol.42, No.473, pp.121-125, 1993.2
- 7) 井上理恵子, 西尾和哉, 古川忠稔, 今井克彦: 非破壊試験を用いた木材のヤング係数推定手法に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.409-412, 2005.5
- 8) (財) 日本住宅・木材技術センター: 構造用木材の強度試験マニュアル, 第3章, pp.71-77, 2011.3
- 9) 藤澤義武, 柏木学, 井上祐二郎: ファコップを用いた材質優良個体の非破壊的選抜技術, 九州森林研究, No.56, pp.180-181, 2003.3
- 10) 佐々木康寿, 山崎真理子: 木質構造における構造部材の保有強度・損傷に関する非破壊検査, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, pp.165-168, 2006.9
- 11) 石栗太, 川島麻里, 飯塚和也, 横田信三, 吉澤伸夫: 27年生ヒノキにおける立木の応力波伝播速度と材質の関係, 材料, 社団法人日本材料学会, Vol.55, No.6, pp.576-582, 2006.6
- 12) 名波直道, 中村昇, 有馬孝禮, 大熊幹章: 応力波による立木の材質測定 (第1報), (第2報), 木材学会誌, Vol.38, No.8, pp.739-752, 1992
- 13) Fakopp Enterprise: FAKOPP Microsecond Timer USER'S GUIDE, http://www.fakopp.com/site/downloads/Fakopp_MT_Guide.pdf, 2012.9.10参照
- 14) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説(2004), 2004.
- 15) 焦鍵, 浪江和隆, 杉野未奈, 多幾山法子, 林康裕: FAKOPPを用いた動的ヤング係数の完全非破壊測定手法の構築 (その1 治具の設計及びFAKOPP試験方法の決定), 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp.673-674, 2012.9
- 16) 浪江和隆, 焦鍵, 杉野未奈, 多幾山法子, 林康裕: FAKOPPを用いた動的ヤング係数の完全非破壊測定手法の構築 (その2 FAKOPPの補正值とヤング係数算出手法の決定), 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, pp.675-676, 2012.9

(2012年9月10日原稿受理, 2012年12月27日採用決定)