

6. 7 古材の性能

6. 7. 1 応力波伝播速度に基づくヤング率推定法の原理

(1) はじめに

人類は古来より現在に至るまで木材を構造材料として利用してきた長い歴史を持っている。特に日本では、台風・地震など幾多の災害を乗り越えて現代までその姿を残している寺院建造物や古民家といった木造建築が多く、これらは文化財的見地から見て高い価値を有している。これらの木造建築には、断面寸法の大きい豪壮長大な部材が使用されているため、その視覚的な迫力や質感、また、長い年月にわたる使用感が現代人の関心を呼び、近年では移築やリフォームのように、解体古材を再使用する事例が徐々に増えてきた。築年数の長い寺院建造物や古民家等で大量に使用されている木材を再評価し、再度使用することは、CO₂の固定機能を持つ木材の低環境負荷性を最大限に活かすことにも貢献するものである。したがって、木材の長期使用は環境保全の観点からも望ましく、このような風潮は歓迎されるべきであろう。しかし、古材の強度性能を適切に判断することなく再使用されることには問題がある。古民家の移築やリフォーム後の構造安全性を確保するためには、再使用される古材の保有強度や内部損傷を的確に把握する必要がある。古材の再使用の可否判定は、多くの場合、熟練大工の目視や経験を頼りにして行われている。保有強度と損傷に関する科学的な数値化は未だ成されていない。さらに、解体前の構造体の状態で非破壊的に部材の強度特性を知ることは実現していない。

本研究では、木造建築物の修理・改築・建替え等において、使用されている構造部材の強度性能を非破壊的に確かめ、これらの部材を安全かつ合理的に再使用するシステムの確立を目的としている。そのために、我々は解体前の構造体の状態で、応力波を用いることにより部材（木材）の強度性能（ヤング率）を推定する方法を開発した。この項では、推定方法の提示に加えて、製材の実大曲げ試験を実施し、推定値と実験値を比較することにより、本推定方法の妥当性を検証する。

(2) 部材ヤング率の評価方法

ヤング率は木材の強度パラメーターとして最も一般的なものであるが、これを求める方法としては(i)負荷法、(ii)周波数解析(打撃法)、(iii)超音波法、(iv)応力波法などがある。このうち(i)では、材料の断面形状を特定する必要がある、また、構造体のままで試験することは不可能である。(ii)では、材料の支持方法が問題となるため、構造体のままの状態での実施はやはり不可能である。また、材料の密度も必要である。(iii)は材料（木材）とセンサーの接触（密着）性に難があり、また、この方法の場合も材料の密度を知る必要がある。技術的には実験室レベルを超えておらず、現場での使用は未だ困難である。これらの方法に比べて、(iv)は作業（応力波伝播速度の測定）が簡便であり、材料の支持方法も不問であるため、現場での簡便な測定法として非常に優位である。

以上のようなことから、本研究では応力波法を対象としている。応力波法では、材料中を伝播する応力波の速度と材料の密度が分かればヤング率を求めることができる。ただし、密度を求めるためには、通常、材料全体あるいは小試片を採取して、その体積と重量を計測するが、この作業は煩雑であり、必ずしも簡単には得られない。また、小試片により得られる密度は材の局所的な値であり、必ずしもその材を代表する値とは言えない。このようなことから、本研究で提示する方法は、研究蓄積が豊富で報告例の多い木材強度に関するデータベースを利用することにより、密度を測定することなく、応力波伝播速度のみからヤング率を推定しようとするものである（特開2007-232698）。

1) 新しい推定方法

材料のヤング率 E 、密度 ρ 、応力波伝播速度 v との間には $E = \rho v^2$ の関係がある。ここで提示

するヤング率の推定法の基本的な考え方は、測定された「応力波伝播速度」から考え得る「ヤング率と密度」の組み合わせを、「ヤング率と密度に関するデータベース」をもとにシミュレーション法を用いて推定するということである。

本方法では、木材の密度について、現実の分布を模擬する任意の密度分布を乱数発生法により求める過程がある。一般には、現実の分布を正規分布等の理論分布で表し、これを用いて模擬することが多い。しかし、木材の場合、その物性や力学特性値を理論分布で正確に表現するためには相当多数の実測値が必要であり、この実験を省略して解析しても、その結果はあくまで仮定のものに留まる。そこで、ここでは、現実の分布に対して理論分布の適用は行わず、データベースの充実を図り、実験値分布そのものを用いることにする。ただし、将来的にデータベースが十分に充実した折には、これを理論分布で表現することも可能となるであろう。

具体的手順を以下に説明する。まず、例えば樹種毎、のような実際の「ヤング率－密度」関係（以下、これを基準データベースと呼ぶ）を用意する。

- ① 基準データベースの密度データについて、その累積頻度曲線を準備する。
- ② 任意の密度 ρ_i をノンパラメトリックに抽出する。すなわち、区間[0、1]の乱数を発生させてこれを①の密度データの累積頻度曲線に当てはめ、対応する密度データ ρ_i を得る。
- ③ 基準データベースの「ヤング率－密度」関係について回帰直線を求める。この際、データのばらつきが不均一であり（任意の密度に対して一定のヤング率分布を示していない）、「ヤング率－密度」関係を単純な回帰直線で表すことが不適当であると判断される場合には、これを是正するために重み付き回帰分析（加重回帰分析）の処理を行う¹⁾。この回帰直線に②で抽出した密度データ ρ_i を代入して、密度データ ρ_i に対応するヤング率の平均値 E_{iave} を求める。これを図 6.7.1-1 に示す。
- ④ 次に回帰残差を任意抽出し、これを③で求めたヤング率の平均値 E_{iave} に加えて所定のヤング率 E_i を求める。ここで、任意の密度 ρ_i に対応するヤング率の回帰残差は正規分布（平均値 = E_{iave} 、分散 = SD_i^2 ）をなすものと仮定する。具体的には、中心極限定理を用いた複数の乱数による方法で標準正規確率変数 V （下式）を計算し、これに基準データベースである「ヤング率－密度」関係から求めたヤング率の残差標準偏差 SD_i を乗じて求める。すなわち、回帰残差 = $V \cdot SD_i$ で求められる。ここで SD_i は、基準データベース「ヤング率－密度」関係のデータのばらつきが均一な場合には、 $SD_i = \text{ヤング率データの標準偏差} \times (1 - \text{「ヤング率－密度」関係の決定係数})^{1/2}$ で求められ、 ρ_i によらず一定となる²⁾。一方、データのばらつきが不均一な場合には、個々の ρ_i に対応する SD_i を何らかの方法により定める³⁾。このようにして得られた回帰残差を③で求めたヤング率の平均値 E_{iave} に加え、これを②で任意に抽出した密度 ρ_i に対応するヤング率 E_i とする（図 6.7.1-1）。

$$V = \sum_{j=1}^n r_j - \frac{n}{2}$$

なお、標準正規確率変数 V に関する上式中、 r_j は j 個目の乱数を意味し、第 1 項は区間 [0、1] の一様乱数 ($r_1, r_2, \dots, r_n$) n 個の和である。また、 n は通常 $n=12$ 程度で十分とされている。^{3, 4)}

- ⑤ 一方、ヤング率 E 、密度 ρ 、応力波伝播速度 v の関係式は $\rho_k = E_i / v^2$ で表される。すなわち、④で求めたヤング率 E_i に実測した応力波伝播速度を対応させることにより、密度 ρ_k を逆推定することができる（図 6.7.1-1）。
- ⑥ ②～⑤を十分多数回（例えば 5000 回）繰返し、 (ρ_k, ρ_i, E_i) に関する推定データ群を得る。
- ⑦ ⑥で得られた推定群のうち、図 6.7.1-1 に示す二つの密度 (ρ_k, ρ_i) がある誤差範囲（例え

ば5%または1%、以下、これを許容誤差と呼ぶ)に収まるものを、応力波伝播速度、密度、ヤング率の三者の関係を充足しうるものとし、推定値の一つとして採用する。

以上のプロセスを図 6.7.1-2 に示す。また、これを「ヤング率推定用プログラム」として作成し PC にインストールした。なお、シミュレーションにおける乱数の発生には表計算ソフト EXCEL (Microsoft 社製) の RAND()関数を用い、また、繰返し計算の回数は 5000 回とした。

2) 応力波伝播速度の測定

応力波伝播速度の測定には、写真 6.7.1-1 に示すハンディタイプの応力波伝播時間測定器 (FAKOPP) を使用した。本機は打ち込み専用センサーに衝撃を加えると発生するエネルギー (応力波) が受信用センサーに到達するまでの時間 (μs) を測定するものである。前節に示す推定手順を実行する計算プログラムに、これら 2 個のセンサー間の距離と応力波伝播時間を入力すれば直ちにヤング率 (および密度) の推定値分布が得られる。

本研究では、次項で示す製材 (120 mm×200 mm×4000 mm) を対象とした曲げ試験の実施前に、応力波伝播速度を測定し、前項で示した方法によりヤング率を推定した。2 個の応力波センサーは、材の側面の中央部 (軸方向) に伝播距離 3800mm の間隔を置き、材表面から約 30 度の傾斜を持たせて打ち込んだ (表面法、写真 6.7.1-1 参照)。

3) 製材の曲げ試験

前項で示した方法で推定したヤング率の妥当性を検証するために、推定ヤング率と製材の曲げ試験で得られた曲げヤング率を比較した。製材の曲げ試験は、ISO 準拠の標準試験法に基づく 3 等分点 4 点負荷法により実施した。⁵⁾ 製材の樹種は、スギ (Japanese cedar: *Cryptomeria japonica* D.Don)、ヒノキ (Japanese cypress: *Chamaecyparis obtusa* Endl.)、ベイマツ

(Douglas-fir: *Pseudotsuga menziesii*) の 3 種 (合計 71 体) で、寸法は 120 (材幅) ×200 (梁背) ×4000 (長さ) mm、いずれも気乾状態であった。試験体は単純支持とし、支持点間距離 (曲げ試験のスパン L) は梁背の 18 倍である 3600mm とした。また、負荷点間距離は 1200mm、試験体の張出し部分は 200mm とした。載荷は、実大強度試験機 (島津製作所製 UH-G1000kNA、最大容量: 1000kN) を用いて定速変位速度 20mm/min のストローク制御で行い、最大荷重に達するまでに要した時間は 3~5 分であった。試験機付属のロードセルから曲げ荷重を、また、試験体中央下部に設置した変位計から曲げたわみを、それぞれデータロガーを用いて測定し、これらをパーソナルコンピュータに取り込み記録した。測定した荷重と中央部曲げたわみの関係から、曲げヤング率 MOE を求めた。

(3) ヤング率の推定と検証

1) ヤング率の推定

本推定法により部材の強度 (ヤング率) を推定する場合、「ヤング率-密度」関係などの木材強度に関するデータベースを基準データベースとして使用する。本報告で使用した基準データベースは、森林総合研究所発行の「製材の強度性能に関するデータベース (機械等級区分データ)」⁶⁾ からの抜粋である。すなわち、アカマツ、カラマツ、エゾ・トドマツ、ヒノキ、ヒバ、スギ、ベイマツ、ベイツガ、シベリア産エゾマツの機械等級区分データである。

まず、実測値の検討に先立って、応力波伝播速度を 4000 m/s と仮定した場合のヤング率推定値について検討した。図 6.7.1-3 の○印は、使用した基準データベース⁶⁾である。これをもとにして推定したヤング率を+印 (許容誤差 5%) と△印 (同 1%) で示した。本推定法は $E=\rho v^2$ を基本原理としているので、図 6.7.1-3 のように推定ヤング率と密度は比例関係を示している。図

6.7.1-3 から明らかなように、本推定法では測定された唯一の応力波伝播速度に対して「可能性のあるヤング率」を分布として与えるため、ヤング率を唯一の値で示すことはできない。図 6.7.1-3 に示した推定ヤング率の分布（ヒストグラム）を図 6.7.1-4 に示す。二つの密度（ ρ_k 、 ρ_i ）が許容誤差範囲に収まる時の有効データ率（2.1 項の⑥）を 5000 回繰返した時、許容誤差範囲内に収まる推定ヤング率の数/5000 も異なり、許容誤差を厳しくすると有効データ率は低くなった。すなわち、許容誤差 5% の場合の有効データ率は 7.00%（350/5000）であるのに対し、許容誤差 1% の場合には 1.74%（87/5000）であった。ただし、ヤング率の推定幅（最小推定値と最大推定値の差）はほとんど変わらなかった。図 6.7.1-4 に示す分布はほとんど正規分布に近い形になっており、ヤング率分布の平均値 $\pm$ 標準偏差は、許容誤差 5% の場合で $7.19\pm 0.87\text{GPa}$ 、許容誤差 1% の場合で $7.16\pm 0.74\text{GPa}$ であった。

以上のようなことから、ある値でヤング率の代表値を示す必要がある場合には、どの値をもって代表するかが問題となる。図 6.7.1-4 に示すように、推定分布形は正規分布に近い形となっており、言い換えれば、この分布の平均値付近の値を推定している頻度（確率）が高いといえる。したがって、ヤング率を唯一の値で示す場合には推定分布の平均値をもって代表する方法が考えられる。他方では、安全側評価の一案として、推定ヤング率分布の最小値または 5% 下限値をもって代表値とすることが考えられる。どの値をもって代表値とすべきかについては、使用する基準データベースが異なれば応力波伝播速度が同じであってもヤング率は異なって推定されることもあり、使用する基準データベースに関する検討や実大材の曲げヤング係数との比較検討ともあわせて、今後さらに詳細な検討が必要である。これらについては続報にて報告する。

2) 製材を対象とした検証

次に、ヤング率推定値を検証するために、製材の曲げ試験で得られた曲げヤング率と比較した。前の 3.1 項で述べたように、推定ヤング率は、図 6.7.1-4 に示すように分布していたため、ここでは推定ヤング率分布の平均値をもって代表値とした。曲げヤング率と推定ヤング率を比較したものを図 6.7.1-5 に示す。これによれば、推定ヤング率の平均値は低ヤング率域で過小評価、また、高ヤング率域で過大評価となる傾向がうかがえるものの、両者はかなり良く一致している。推定値に及ぼす基準データベースの影響等、検討すべき課題は残されているが、図 6.7.1-5 の結果は本推定法によってヤング率を求めることが可能であること、推定ヤング率分布の平均値をもって代表値とできることを示唆するものである。

さらに、製材の密度を測定し、これと応力波伝播速度からヤング率（ $=\rho v^2$ ）を求め、これと推定ヤング率を比較した結果を図 6.7.1-6 に示す。図より明らかなように、この場合も両者は良く一致している。すなわち、図 6.7.1-5 で示すように応力波伝播速度のみから推定したヤング率は、図 6.7.1-6 に示す密度と応力波伝播速度から求めたヤング率とほぼ同水準の推定精度を示しており、本項で提示した新しい推定方法の妥当性が裏付けられる。

(4) おわりに

木造建築物などの構造体に組み込まれた状態の部材（木材）に対して、「応力波伝播速度」のみを測定することで部材のヤング率を推定するための新しい方法を提示した。これによれば、容易に正確な測定が可能な「応力波伝播速度」のみを用いて、密度を知ることなくヤング率を推定することができる。この方法は、研究蓄積が豊富な「木材強度性能と密度」に関するデータベースを基にして、シミュレーション法によりヤング率を推定するものである。この方法を用いて推定した製材（71 体）のヤング率 MOE-e について、別途行った曲げ試験より求めた曲げヤング率 MOE-b と比較したところ、両者は良く一致した。また、同じ製材の密度を求め、これと応力波伝播速度から求められるヤング率 MOR-d を推定ヤング率 MOE-e と比較したところ、これも良い一致を示した。これ

らの結果は、本項で示したヤング率の推定法が有用であることを示唆するもので、例えば、木造建築物の改修・改築等の際、使用されている構造部材の再使用を考える場合、現場における簡便な科学的評価に有効である。さらに推定精度を向上させるために、使用する基準データベースや推定分布のどの値をもって代表値とするかが今後の検討課題である。また、応力波伝播時間測定器とレーザー距離計および本推定プログラムを組み合わせた携帯型ヤング率測定器の開発が期待される。

参考文献

1. 山崎真理子、平嶋義彦、佐々木康寿：建築解体木材の強度特性、日本建築学会構造系論文集、588、pp.127-132、2005
2. 平嶋義彦、杉原未奈、佐々木康寿、安藤幸世、山崎真理子：古材の強度特性（第1報）、ケヤキおよびアカマツの引張強度特性、木材学会誌、50(5)、pp.301-309、2004
3. 星谷 勝、石井 清共著「構造物の信頼性設計法」pp.22-23、pp.84-85(1986)鹿島出版会、東京.
4. 宮川公男著「基本統計学（第3版）」pp.162-165、pp.195-199(1998)有斐閣、東京.
5. 日本建築学会「木質構造限界状態設計指針（案）・同解説」pp.336-342(2003)丸善、東京.
6. 森林総合研究所強度性能研究会：「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<7>、(2005).

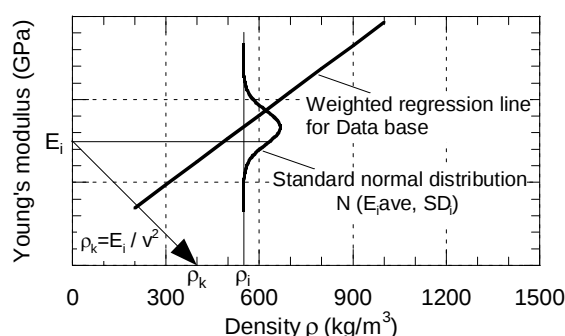
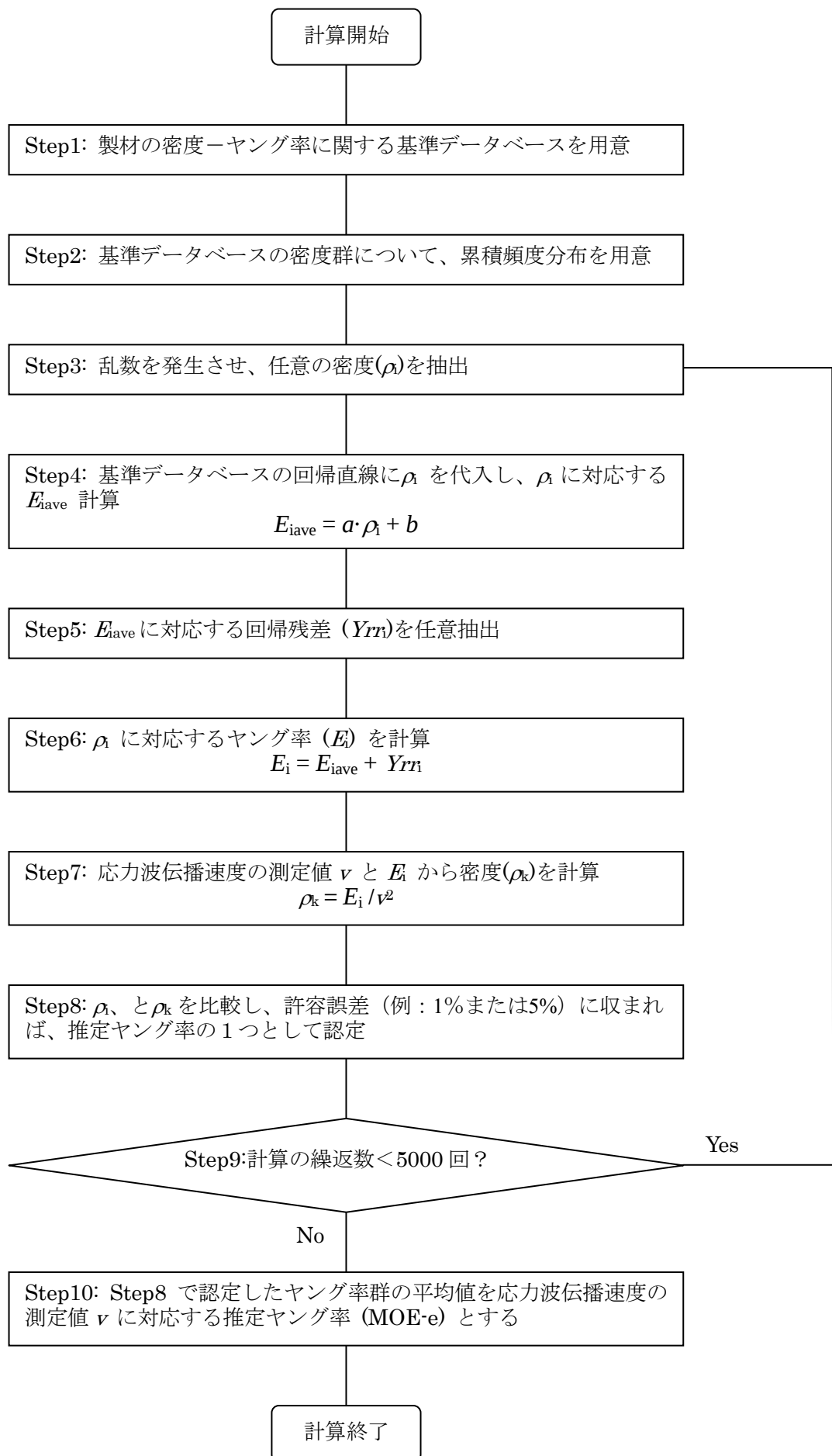


図 6.7.1-1 モンテカルロシミュレーションを用いたヤング率の推定



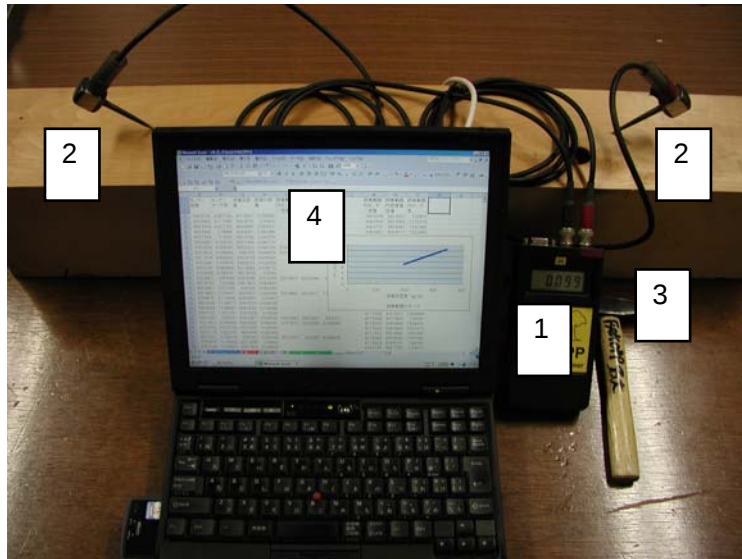


写真 6.7.1-1 ヤング率推定装置. 1、 応力波伝播時間測定器 (FAKOPP); 2、 応力波センサー; 3、ハンマー; 4、 ヤング率推定プログラムをインストールしたパソコン.

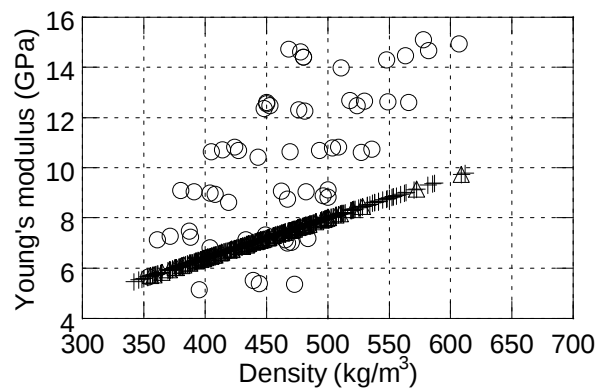


図 6.7.1-3 MSR 材のデータベースとヤング率推定値

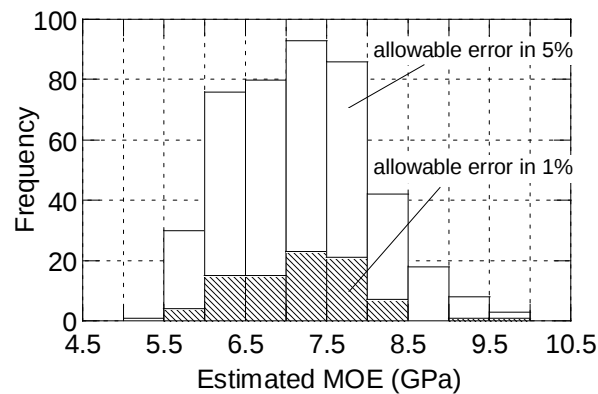


図 6.7.1-4 ヤング率推定値 (前図) のヒストグラム

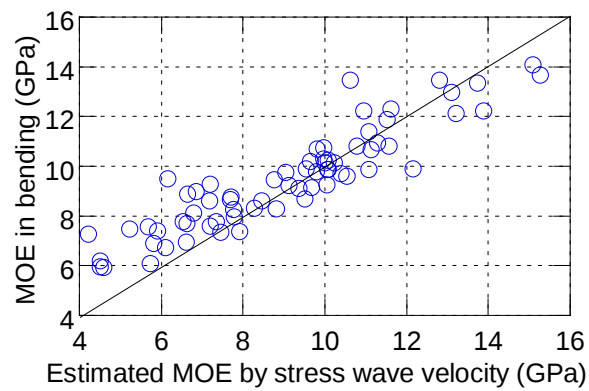


図 6. 7. 1-5 ヤング率推定値と曲げヤング率の比較

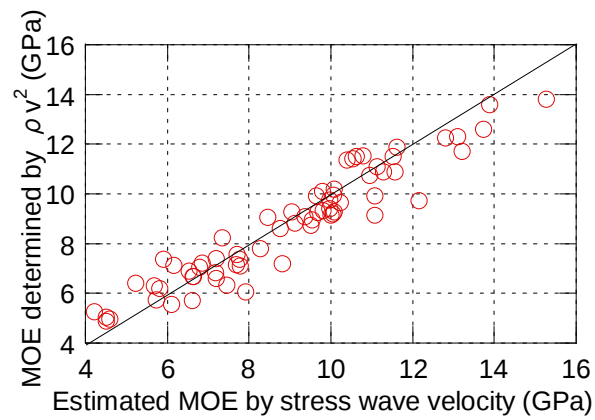


図 6. 7. 1-6 応力波のみによるヤング率推定値と密度、応力波によるヤング率の比較

6. 7. 2 古建築部材の応力波伝播速度および推定ヤング率

(1) はじめに

既存の木質構造物を改築・改修する際、その部材は、健全性の保証があればリユースを希望されることがある。特に、社寺建築や古民家などの文化的存在感が大きい伝統的建築物の改築では、発注者（施主）や受注者（設計士、施工会社）にそうした希望が多い。部材の健全性は、一般に熟練技能を有した棟梁らにより目視・打音検査で判断される。しかしながら、近年、木材の強度的健全性を経験的に熟知した棟梁は徐々に減少しており、検査できる人材の減少に伴い誤った検査事例が増加することが懸念される。また、社寺建築や古民家では長大な木材が多く使用されているが、そうした材料の場合に①内部欠陥に関する評価が困難、②外観的印象の先行による健全性の過大評価といったことも危惧される。一般市民の建築物の安全性に対する意識は高くなっており、感覚的手法だけではユーザーの要望に対して不十分となってきた。

一方、特に社寺や古民家で使用される長大な木材について、新しい資材（樹木）は減少の傾向にあると聞く。すなわち、資源保持の観点からも、現在使用されている構造部材の中で健全なものについては改築・改修後もリユースされるのが望ましく、その健全性を明確にする手法を開発する必要がある。ここでは、2004 年から社寺を中心に経年使用された構造部材のヤング率を非破壊検査の概要を整理し、今後の基礎情報とする。

(2) 調査方法

1) 調査の流れ

これまでの調査ニーズとしては、建物を全改築するか、それとも部分的に部材を交換しつつ建物のプランを新たに作る改修とするかといった計画立案を目的としたものが多い。調査の流れを図 6.7.2-1 に示す。設計を請け負った設計事務所から大学側に、対象建物が改築・改修される前に部材調査が依頼される。大学側の調査結果が設計事務所に提出された後、施主および社寺の場合には地域住民（檀家、氏子）に調査結果の報告と、これに基づく改築・改修計画の提案がなされる。その際、必要があれば、大学からも調査概要、木材の特性、森林資源のライフサイクルなどについて説明を行う。改修時には、不具合が見つかった部位の補修を行うために、工事の元請・施工を実際に行うゼネコンや工務店の関係者と補修方法を検討する。

2) 応力波伝播速度の測定およびヤング率の推定

非破壊検査では応力波伝播速度を測定し、部材のヤング率の推定と内部欠陥の探傷を行った。応力波伝播時間の測定方法ならびに応力波伝播速度からヤング率を推定する方法は、前出の 6.6.1 に示した通りである。応力波伝播速度は、安定した値が得られるように 1 箇所あたり 3 回測定し、その平均値を対象材の応力波伝播速度とした。また、推定に用いた基準データベースは、機械等級区分材の平均密度と平均ヤング率（データの出典：森林総合研究所強度性能研究会：「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<7>、(2005)）とした。

(3) 調査結果

1) 調査数

調査を行った伝統構法建築物と測定部材に関する概要を表 6.7.2-1 に、一例を写真 6.7.2-1～6.7.2-4 に示す。建築物は調査の時点で築 70～300 年の寺院（本堂、庫裏、山門、集会施設）13 件、社殿 1 件、民家 2 件の計 16 件である（平成 23 年 2 月現在）。測定本数は延べ 723 本（解体前後の重複有）（繊維方向 713 本、半径方向 94 本）であり、また、測定総数は 1659 箇所（繊維方向 1381 箇所、半径方向 278 箇所）である。測定部材は、梁 321 本、柱 222 本、登り梁 50 本、束柱 5 本、その他 99 本である。柱部材の樹種はアカマツ、カラマツ、ヒノキが多く、この他にスギ、ツガ、カツラ、ケヤキがあった（ただし、詳細な樹種鑑定は行っていない）。

2) 応力波伝播速度とこれより推定されるヤング率

繊維方向について測定した応力波伝播速度の分布を図 6.7.2-2 に示す。これより、古材の繊維

方向の応力波伝播速度は 4000～5000 (m/s)程度が多く、平均値±標準偏差は 4646±487 (m/s) であった。これより、推定したヤング率とアカマツ（新材）の基準弾性係数を比較すると、 E_0 (10.0GPa) 以上のデータの割合は 55.6%であり、一方、 $E_{0.05}$ (6.5GPa) を下回るデータの割合は 3.7%であった。なお、6530 (m/s) 以上の速度値については、データベースの特性に起因してヤング率を推定することが出来なかった。

次に、測定事例を示す。図 6.7.2-4 には、愛知県豊田市内の民家 S 邸（築 112 年）の土台について、目視上、健全な材 ($v=4973.4(\text{m/s})$) と目視で腐朽が認められた部材 ($v=4204.5(\text{m/s})$) のそれぞれについて、シミュレーション法により推定誤差範囲 5%で有効となったヤング率の分布を示す。腐朽材のヤング率分布は、絶対評価をすれば必ずしも小さな値ではないが、同一環境の健全な対照材と比較すれば明らかに小さい。ここに示した部材は外観上の腐朽が確認できたが、古材の場合には、経年使用により内部腐朽が進行することもあり、外観上には腐朽が確認できないこともある。そのような状況に対して、このような同一環境で使用された健全材との相対評価は有用と思われる。

また、神奈川県三浦市内の光念寺本堂（築 270 年、写真 6.7.2-4）では、柱（推定樹種はヒノキ、マツ）、頭貫、虹梁の各部材について、部材調査を行った。光念寺では、内陣部の構造材や天上に文化価値の高い彩色や天上画があったため、改修に際して、特に内陣部の構造材の再使用可能性を検討した。写真 6.7.2-5 に解体前の、また写真 6.7.2-6 に解体後（再使用のためのクリーニング後）の非破壊検査の様子を示す。測定結果として、解体前と解体後の繊維方向の推定ヤング率を図 6.7.2-5 に示す。これより、内陣内の丸柱について、繊維方向ヤング率は一般的な構造材のヤング率を満たしており、再使用上の問題は無いと判断された。虹梁や頭貫ではヤング率が若干小さい材も見受けられたが、これらについては、荷重負担が小さい部位に使うなら再使用可能であると判断した。一方、これらの材について、内部欠陥を探傷するために、半径方向の測定（床面からの高さを変えて 5～6 箇所、同一高さ位置について直交する 2 方向から測定）を行ったところ、解体前調査で丸柱 2 本（C1、C2）に不具合が見られ、さらに C2 材については解体後の測定でも床下部に不具合を、また新たに丸柱 10 材に不具合を確認した。その結果、C1 材は交換、C2 材と丸柱 10 材は、梁の架け方を工夫し、荷重負担を極力抑えることで対応した。

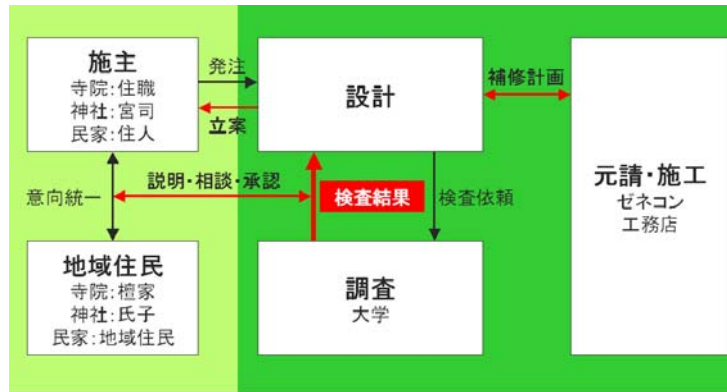


図 6. 7. 2-1 調査関係者の相関図



写真 6. 7. 2-1 調査建物例（興国寺改修前）



写真 6. 7. 2-2 調査建物例（興国寺改修中）



写真 6. 7. 2-3 調査建物例（善光寺山門改修中）



写真 6. 7. 2-4 調査建物例（光念寺）



写真 6. 7. 2-5 光念寺内陣の解体前調査



写真 6. 7. 2-6 光念寺丸柱の解体後調査

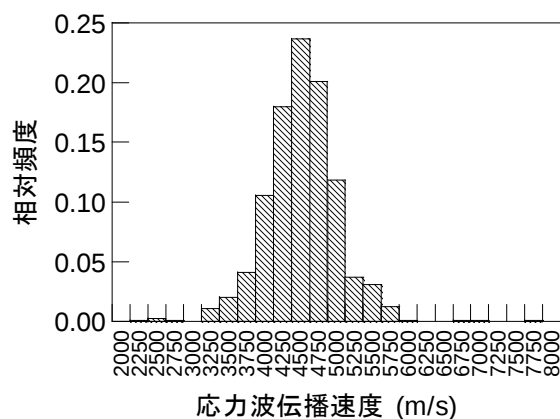


図 6.7.2-2 繊維方向応力波伝播速度分布

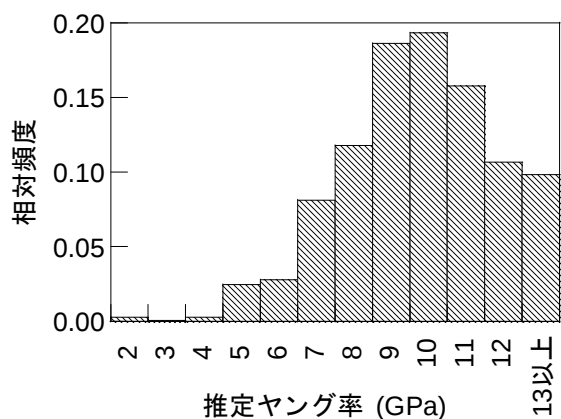


図 6.7.2-3 繊維方向推定ヤング率分布

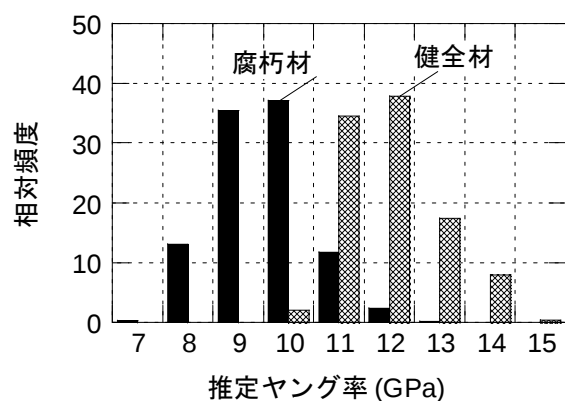


図 6.7.2-4 健全材と腐朽材のヤング率分布

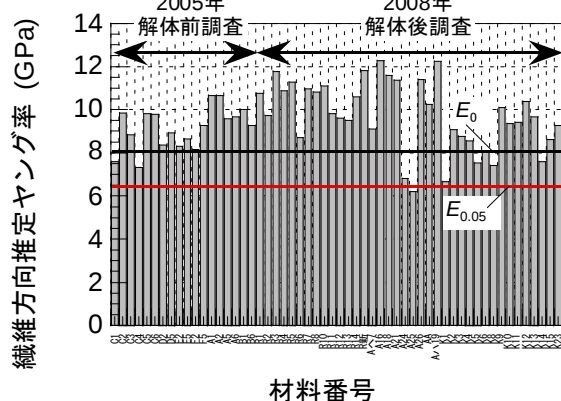


図 6.7.2-5 光念寺本堂部材のヤング率

表 6.7.2-1 既存構造物に使用されている部材の非破壊調査

建物No.	所在地	建物名称	築年数	部材別 (本)					測定方向 (本)		測定時期 (本)	
				梁・小屋梁・鴨居 (横架材)	柱	登り梁・隅はね木	束柱	その他	繊維	半径	解体前	解体後
1	須坂市	興国寺	庫裏	250	5	0	0	0	5	5	5	0
2	笹平	正源寺	本堂	154	3	2	0	0	5	0	5	0
3	上田市	宗徳寺	本堂		0	8	0	0	6	8	8	0
4	長野市	善光寺山門	山門	254	0	1	8	4	63	7	11	55
5	佐久市	貞祥寺	集会施設		6	5	0	1	12	0	12	0
6	三浦	光念寺	本堂	270	2	18	0	0	20	20	20	0
7	長野市	善光寺明照殿	集会施設	92	10	11	0	0	31	0	31	0
8	須坂市	興国寺 (追加)	庫裏	250	2	10	0	0	12	0	12	0
9	長野市	善光寺明照殿	集会施設小屋組	92	29	0	0	0	29	0	29	0
10	須坂市	興国寺 (実大試験)	庫裏	250	15	5	0	0	20	0	0	20
11	豊田市	民家	母屋・米蔵	112, 200	9	6	0	0	21	0	21	0
12	豊田市	民家	茶屋	150	4	3	0	0	7	0	7	0
13	長野市	善光寺明照殿 (追加)	集会施設	92	0	13	0	0	13	9	0	13
14	町田市	箭幹八幡宮	拝殿	92	4	12	0	0	21	0	21	0
15	小諸市	玄江院	本堂・庫裡	297	47	60	8	0	115	3	115	0
16	三浦市	光念寺	本堂 解体後	270	0	14	0	0	38	38	0	38
17	小諸市	玄江院	本堂小屋裏	297	5	0	0	0	5	0	5	0
18	小諸市	玄江院	本堂小屋裏	297	5	0	0	0	5	0	0	5
19	佐久市	善松院	本堂		29	0	33	0	63	0	63	0
20	長野市	善光寺大勧進萬善堂	本堂	115	32	27	1	0	60	1	60	0
21	長野市	善光寺大勧進萬善堂	本堂 再調査	115	0	27	0	0	27	0	27	0
22	佐久市	正安寺	本堂・庫裡		63	0	0	0	63	0	63	0
23	須坂市	浄運寺	本堂		56	0	0	0	56	3	56	0
24	津市	民家	母屋	70	3	18	0	0	21	0	21	0
合計		16		329	240	50	5	99	718	94	592	131

6. 7. 3 古建築部材の応力波伝播特性

(1) 長野・善光寺大勧進萬善堂古建築部材非破壊検査

1) 対象材料

建物：善光寺大勧進萬善堂（図 6.7.3-1，写真 6.7.3-1）

天台宗，1894 年建立（築後年数：116 年），2010 年 12 月現在小屋組改修中

（〒381-8501 長野県長野市大字長野元善町 492）

部位：大梁，はね木，丸柱

樹種：大梁，はね木：不明（今後，鑑定予定）

丸柱：ケヤキ

本数：60 本（大梁 32 本・測定箇所 80 箇所，はね木 1 本，丸柱 27 本・同 43 箇所）

寸法：大梁：直径 229～541mm，長さ 5.81～19.58m

小屋梁：直径 182～385mm，長さ 2.15～15.91m

束柱：136mm 角，長さ 0.68～6.06m

2) 非破壊検査

①現地測定

日時：平成 21 年 12 月 3～4 日（写真 6.7.3-1～写真 6.7.3-6），平成 22 年 11 月 2～4 日

測定方法：応力波伝播速度の測定（FAKOPP を使用）

②力学解析

解析方法：ヤング率の推定（既存の基準データベースを用いたシミュレーション法による。なお、今回は安全側の評価となるよう考慮して、シミュレーション法により推定されたヤング率の 75% 値をその部材のヤング率とした）。および大梁のたわみ量と応力度の解析。

3) 部材のヤング率

応力波伝播速度から推定される各部材のヤング率とその分布を図 6.7.3-2、および図 6.7.3-3 に、また機械等級区分製材のヤング率基準値および本測定結果を表 6.7.3-1 にそれぞれ示す。大梁およびはね木では、66% の材が E90 相当であったが、丸柱では全ての材料が E70 以下であるとされた。ただし、これにはケヤキのヤング率の推定に針葉樹材のデータベースを用いたことが影響しており、実際のヤング率は今回の推定値より大きいと思われる。大梁で E50 と評価された材は、Y2-C と Y6 である。特に Y6 の正面南側は、目視では表面に異常は全く認められなかったが、測定値が安定せず（表 6.7.3-2）、材料内部に何らかの異常があると推察された。材料の表層を削って内部を検査したところ、内部に蟻道が発見された（写真 6.7.3-4 参照）。

4) 大梁のたわみと応力

上述の推定ヤング率と小屋組構造の実測データから、下部小屋梁のたわみと生じている応力の推定を試みた。すなわち、本来であれば、接合部の接合剛性を考慮に入れた立体構造解析を行うべきであるが、その前段階として、接合部はローラー支持または剛節とする 2 種類の仮定を置き、2 次元骨組構造解析を行った¹⁾。大梁に作用する鉛直荷重は、単位面積あたりの屋根瓦の重量 167kg/m^2 ²⁾ に屋根面積 979m^2 を乗じた値と、木材の密度 (500kg/m^3 とする) に小屋組の主な構造部材の体積 70m^3 を乗じた値との和とした。その結果、大梁に作用する鉛直荷重は 1945.2kN と試算された（（参考）（屋根面積あたりの屋根の重量を 120kg/m^2 （伝統的木造建築の単位重量表）とした場合： 1494.3kN ，屋根面積あたりの屋根の重量を 1300N/m^2 （重要文化財（建造物）基礎診断実施要領）とした場合、 1615.7kN ）。小屋組の床面積は 370.7m^2 であり、すなわち、単位床面積あたりの固定荷重は 5.247kN/m^2 となる。これを図形的に等分散して、各梁に作用する

鉛直荷重を求めた。解析では、対象とする梁材の下部に交差する梁や柱がある位置を支点とし、上部に梁、束柱がある位置を荷重点とした。

解析の結果、梁間（Y）方向の材は Y4.5 を除いて、ほとんどの荷重点が支点の上にあるため、たわみは数ミリ程度にとどまった。ただし、Y4.5 は、桁行（X）方向の材と同様、荷重点が支点の上にあるわけではないため、たわみ量はローラー支持の仮定では最大で 5.9cm、剛節の仮定では 4.5cm となった（図なし）。X 方向の材については、ローラー支持、剛節共に Y1-Y3 間の X2 と Y6-Y8 間の X6 で許容値（L/300）を超えた（図 6.7.3-4）。これらの材は断面寸法が小さく、そのためにたわみ量が大きくなったと考えられる。また、Y3-Y6 間の X4 と X6 は、断面寸法が小さいわけではないが支点間距離が長いため、たわみ量が許容値を超えたと考えられる。

次に、梁に生じる応力を解析し、許容応力度計算を行った。まず、部材応力として、梁に生じるせん断力と曲げモーメントから部材断面に生じる軸方向の最大応力度 σ_{xm} ³⁾ と、曲げモーメントのみにより生じる最大曲げ応力度 σ_m を求めた（次式）。

$$\sigma_{xm} = \frac{X_j}{A} \pm \frac{M_i - Y_i \cdot x}{Z}, \quad \sigma_m = \frac{M_{\max}}{Z}$$

（ X_j ：節点 j に作用する軸力、 Y_i ：節点 i に作用するせん断力、 x ：節点 i から i-j 間中央までの距離、 z ：断面係数）

一方、材料の許容応力度は、推定したヤング率から区分された機械等級に基づいた。許容応力度には、長期、短期の許容応力度、および梁せいなどを考慮した設計用許容応力度 f ⁴⁾（次式）を用いた。

$$f = K_d \cdot K_z \cdot K_s \cdot K_m \cdot \sigma_f$$

（ K_d ：荷重継続期間影響係数＝1.0、 K_z ：寸法効果係数：梁背に応じて決定、 K_s ：システム係数＝1.0、 K_m ：含水率影響係数＝1.0、 σ_f ：基準許容応力度）

表 6.7.3-3 に、各部材の応力 σ_{xm} と σ_m 、ならびに材料の E 等級に応じた設計用許容応力度 f をまとめる。いずれの部材についても、 $\sigma_{xm} < \sigma_m$ となったため、 σ_m と f を比較したところ、すべての部材について、部材応力が設計用許容応力度を超過し、危険側と判断されることになった。これは、1. ヤング率を 75% で評価していること（過度の安全率）、2. 今回の試算では接合部の剛性が評価されておらず、その点が不十分であること、3. また、今回の解析でははね木の効果を考慮していない、4. そもそも構造設計が宜しくない（小屋組の大きさに比べて部材断面が小さく、かつ梁スパンが大きい）事、などが理由として考えられる。また、ヤング率を基に決定した基準強度は新材製材のものであり、かつ樹種が不明なため全体の最小値を使っていること、今回測定した材はたいこ材であり、一般にたいこ材は製材より強度上優位性があると考えられことなどが挙げられる。これらの対策としても、古材の実大強度データベースの構築が求められる。

5) 解体時のたわみ戻り量の測定

小屋組の改築に際し、現存の小屋組の除去に伴う除荷時の、大梁のたわみ戻り量を測定している。

測定装置の設置：平成 22 年 11 月 2 日（写真 6.7.3-7～写真 6.7.3-8）

第 1 回測定（ゼロ点）：平成 22 年 12 月 2 日

測定方法 1：オートレベルを用いた計測

- ・測定時の振動を避ける為、大梁の上（Y4 の X6,7 間）に直接オートレベルを設置。
- ・測定対象の各大梁に地面と垂直な材（10×50mm の角材）をビスで取り付けた。
- ・屋根解体の前に、オートレベルからのレーザー位置を各大梁の垂直材に印した（ゼロ点）。

- ・その際、基準として大勧進の中の動かない場所（内陣柱（X3*Y4）上部）にも垂直材を取り付け、レーザーの位置を印した（当初大勧進の外に基準点を取る予定だったが、オートレベルを設置した梁からの屋外測定が不可能であった為、屋内の動かない点を基準とした）。

- ・また、建物自体の沈み込みの可能性を考え、屋外にも基準となるポイント（南側渡り廊下壁、事務室棟支柱）に、レーザー位置を印した（内陣敷居の上から測定）。

- ・測定箇所は、上記の計算上たわみが大きいと予想される部材の最大たわみ部及び継手・接合部の箇所とした。

- ・今後、屋根の解体期間を通じて、除去した屋根および小屋組の重量を計測（その際に、解体された箇所・程度も記録）。

- ・その間、各測定箇所のレベルを複数回測定予定。

- ・基準ポイントの差を考慮してたわみの戻り量を計測。

測定方法 2：歪ゲージによる計測

- ・大梁の引張側および束柱（応力測定）に、紙やすりを用いて表面処理をした後、歪ゲージ（東京測器 PLW-60-11, ゲージ長 60mm）を貼付した。貼付後、2cm 厚のゴム板により歪ゲージを保護した。設置箇所は図 6.7.3-5 に示す。

- ・データの計測には、データロガー（DL1200）を用いる（ただし、自動計測ではない）。

- ・今後、解体した材の重量計測に合わせて計測。

- ・その他に週に 1 回程度測定中。

（2）三重古民家の解体前部材調査

1）供試材

建物：在来構法民家（築後年数：70 年？）

部位：柱、梁

樹種：ヒノキ

本数：17 本（柱 14 本，梁 3 本）

2）非破壊検査

場所：現地（写真 6.7.3-9～写真 6.7.3-13）

日時：平成 22 年 9 月 13 日

試験方法：応力波伝播速度の測定

3）結果

測定結果を表 6.7.3-4 に示す。

引用文献

1) 山下四郎，田中寿美：エクセル有限要素法入門・骨組構造解析編，インデックス出版，2004.8

2) 積算による

3) 佐道健：新編木材工学，養賢堂，pp.427-431，1985.7

4) 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―，pp.156-161，1973.4

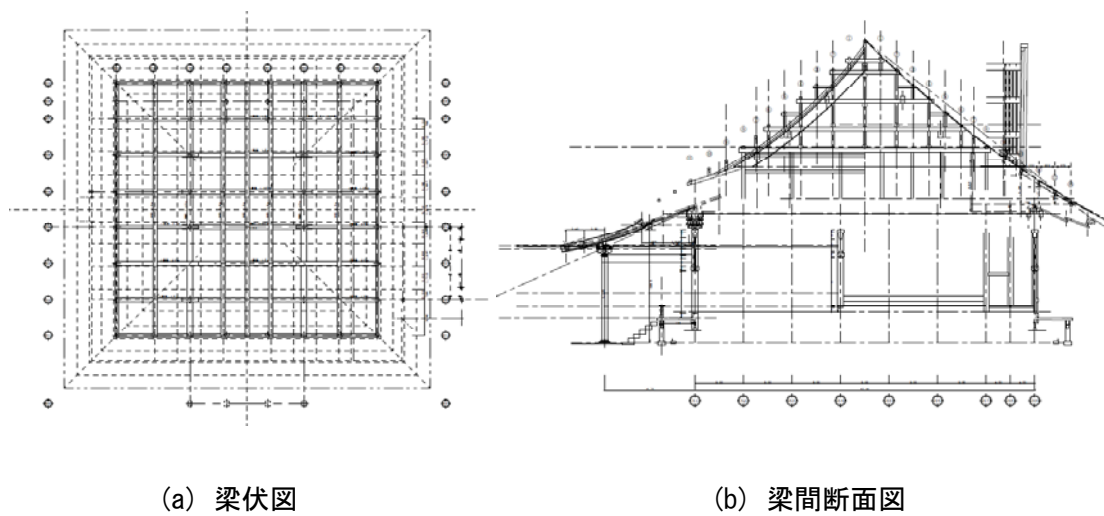


図 6.7.3-1 善光寺大勧進萬善堂小屋組

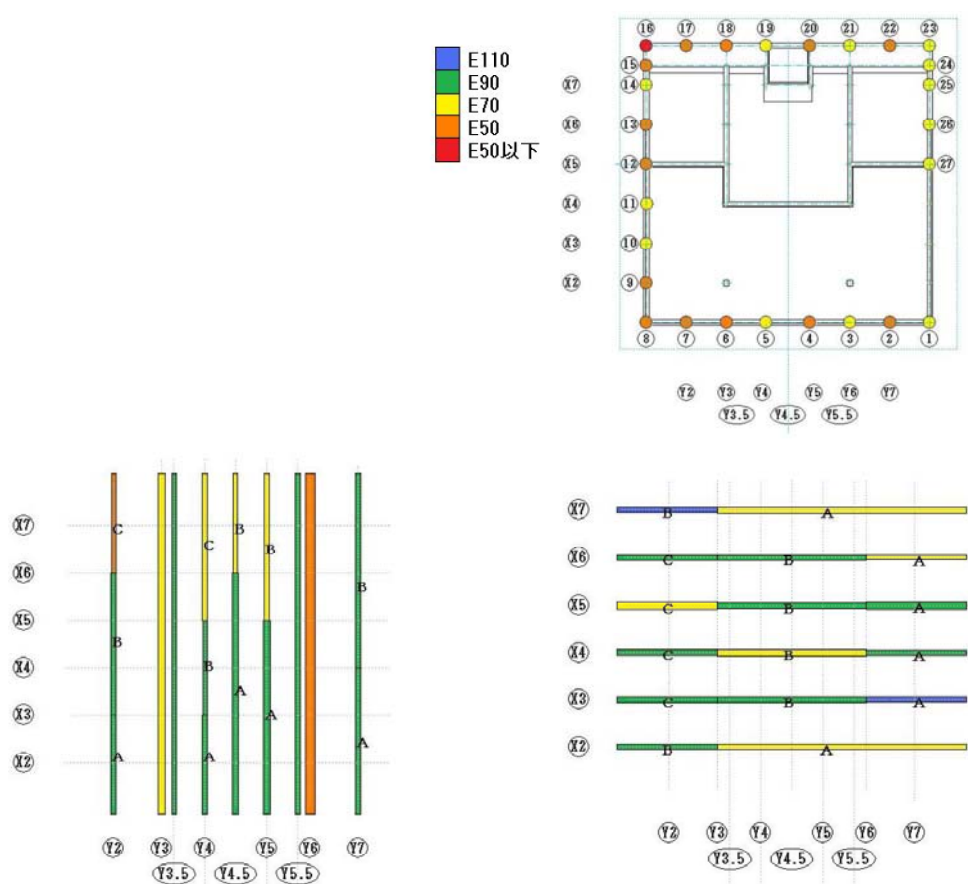


図 6.7.3-2 各部材の推定ヤング率

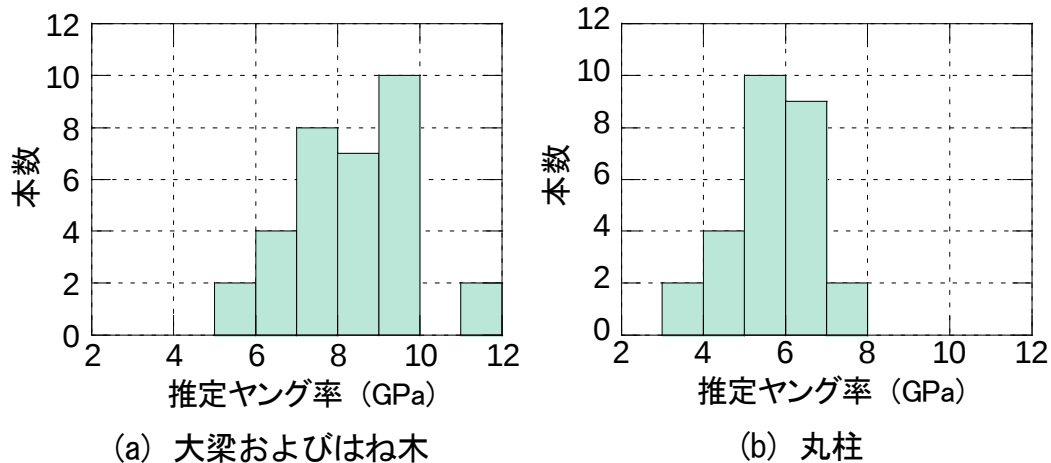
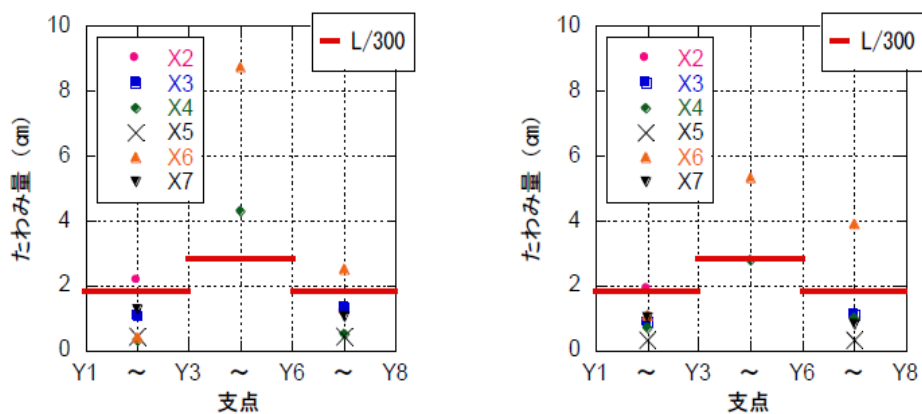


図 6.7.3-3 萬善堂構造部材のヤング率分布



ローラー支持におけるたわみ量

剛節合におけるたわみ量

図 6.7.3-4 ローラー支持および剛接合における X 方向部材のたわみ量

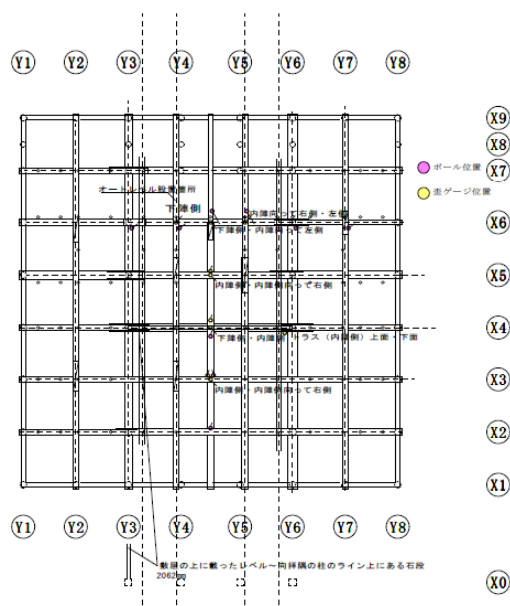


図 6.7.3-5 たわみの戻り量の測定箇所

表 6. 7. 3-1 機械等級区分製材のヤング係数基準値および萬善堂測定結果

等級	ヤング率 (GPa)		本数			備考
	以上	未満	大梁	はね木	丸柱	
E50以下			-	-	1	
E 50	3.9	5.9	2	-	13	アカマツの場合は設定無し
E 70	5.9	7.8	8	-	13	
E 90	7.8	9.8	20	1	-	
E 110	9.8	11.8	2	-	-	
E 130	11.8	13.7	-	-	-	
E 150	13.7	15.7	-	-	-	

表 6. 7. 3-2 蟻害材 (Y6) の測定結果

	応力波①	応力波②	応力波③	備考		
	μs	μs	μs			
Y6	1244	1492	1231	繊維方向	正面側半分	入口側
	1483	1513	1262	繊維方向	正面側半分	入口側
	1538	1527	1540	繊維方向	正面側半分	入口側
	1177	1171	1164	繊維方向	正面側半分	入口側 先端なしで計測
	260	264	266	半径方向	先端から0.481m	
	979	980	973	半径方向	先端から1.424m	
	355	357	360	半径方向	先端から2.153m	
	236	229	229	半径方向	先端から2.644m	

表6. 7. 3-3 各部材に作用する応力度と許容応力度

部材	ヤング率による 等級	許容応力度			σ_{xm}	σ_m	判定
		長期	短期	f			
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		N/mm ²	
X2-A	E 70	4.4	8.0	3.6	9.35	15.06	×
X2-B	E 90	7.7	14.0	7.0	17.41	28.24	×
X3-A	E 110	11.2	20.4	10.2	14.33	23.11	×
X3-B	E 90	7.7	14.0	6.3	6.52	10.65	×
X3-C	E 90	7.7	14.0	6.3	10.75	17.29	×
X4-A	E 90	7.7	14.0	6.3	14.91	20.55	×
X4-B	E 70	4.4	8.0	3.5	9.31	13.56	×
X4-C	E 90	7.7	14.0	6.3	13.27	18.00	×
X5-A	E 90	7.7	14.0	6.1	4.70	7.48	×
X5-B	E 90	7.7	14.0	6.3	4.93	8.72	×
X5-C	E 70	4.4	8.0	3.4	4.12	6.56	×
X6-A	E 70	4.4	8.0	4.0	32.68	46.69	×
X6-B	E 90	7.7	14.0	7.0	19.88	28.45	×
X6-C	E 90	7.7	14.0	6.4	20.26	27.11	×
X7-A	E 70	4.4	8.0	3.6	8.74	13.96	×
X7-B	E 110	11.2	20.4	10.2	13.81	22.15	×
Y4.5-A	E 90	7.7	14.0	6.4	10.33	37.49	×
Y4.5-B	E 70	4.4	8.0	4.0	1.61	4.52	×

○: $\sigma_m \leq f$ 値, ×: $\sigma_m \geq f$ 値

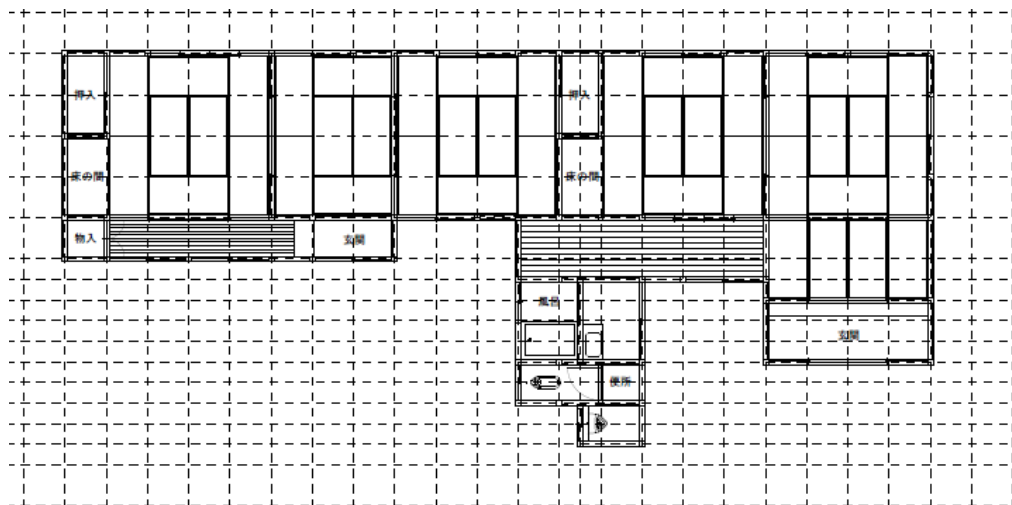


図 6. 7. 3-6 三重古民家平面図

表6. 7. 3-4 三重古民家材解体前非破壊検査

No.	部位	応力波伝播速度 (m/s)	推定ヤング率 (GPa)		
			基準データベース		
			ヒノキ	全樹種	機械等級
B-1	梁	5836	—	20.4	16.1
B-2	梁	5674	—	18.1	15.2
B-3	梁	5803	—	19.9	16.0
C-1	柱	5407	13.1	15.2	14.0
C-2	柱	4647	11.2	9.0	10.2
C-3	柱	5077	12.8	12.0	12.3
C-4	柱	5499	13.1	16.2	14.4
C-5	柱	4923	12.2	10.8	11.6
C-6	柱	4732	11.5	9.5	10.6
C-11	柱	5071	12.7	11.9	12.3
C-12	柱	4906	12.1	10.7	11.5
C-13	柱	5401	13.1	15.1	13.9
C-14	柱	5196	12.9	13.0	12.9
C-15	柱	5034	12.6	11.7	12.1
C-16	柱	5275	13.0	13.8	13.3
C-17	柱	4552	10.8	8.5	9.7
C-18	柱	5796	—	19.8	16.0



写真 6. 7. 3-1 善光寺大勸進萬善堂



写真 6. 7. 3-2 萬善堂小屋組内部



写真 6. 7. 3-3 小屋梁の測定の様子



写真 6. 7. 3-4 蟻害が見つかった梁



写真 6. 7. 3-5 萬善堂ケヤキ丸柱



写真 6. 7. 3-6 ケヤキ丸柱の測定の様子



写真 6. 7. 3-7 萬善堂小屋組解体前調査



写真 6. 7. 3-8 ひずみの測定



写真 6. 7. 3-9 三重古民家(1) 外観

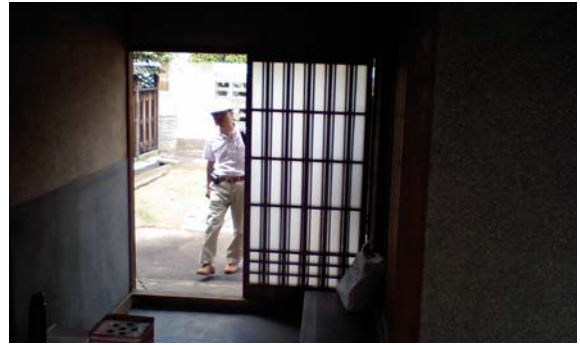


写真 6. 7. 3-10 三重古民家(2) 玄関



写真 6. 7. 3-11 三重古民家(3) 内部



写真 6. 7. 3-12 三重古民家(4) 座敷脇の廊下



写真 6. 7. 3-13 三重古民家(5) 梁の測定

6. 7. 4 実大材の曲げ性能

(1) 供試材

- 1) 建物：曹洞宗鷹取山玄江院本堂（〒384-0084 長野県小諸市耳取 1922）
1711 年建立 2008 年解体（築後年数：298 年）
- 2) 部位：柱，樹種：ケヤキ，本数：1 体
- 3) 寸法：直径 262.5mm 円形近似，長さ 4596mm，欠損有
- 4) 密度：679.6kg/m³（欠損部分を無視），表面含水率：8.4%

(2) 実大試験

- 1) 場所：長野県林業総合センター
- 2) 日時：平成 22 年 8 月 26～27 日
- 3) 試験方法：3 等分点 4 点曲げ試験，スパン 4320mm，支点－負荷点間距離 1440mm
たわみ速度：15mm/min.

(3) 結果

試験結果について、欠損部分を考慮していない見かけの、MOE－MOR 関係を図 6.7.4-1 に示す。今回のデータと併せて、これまでに実大試験を行った 25 体の強度データ（岐阜および長野県下で解体された 5 寺院（築後年数は約 70,125,255,269,280 年）の本堂・庫裏より採取した。部位は梁、柱、大引。樹種はツガ、アカマツ、カラマツ、ケヤキ、スギ。実大曲げ試験方法：ISO に準じた方法（4 点負荷法，ただし一部は中央集中負荷法））を示す。図中のプロットは梁材を○で、柱材を□で、また大引材を△である。今回実験したケヤキ柱材は■で示した。また、図中には「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」機械等級製材の繊維方向特性値より新材（アカマツ、カラマツ、エゾマツ、スギ）の基準材料強度 F_b 値（全樹種グループの最小値を採用）も示した。

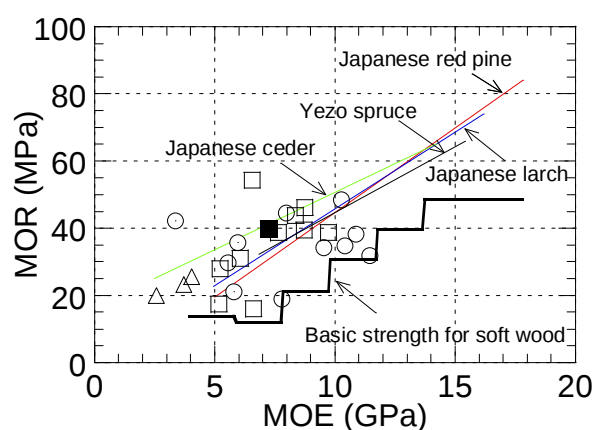


図 6.7.4-1 古材の見かけの MOE-MOR 関係

表6.7.4-1 実大試験体の性状

供試材記号	寺院名称	使用部位	築後年数	樹種名	主な欠点	断面形状	長さ(cm)	断面寸法(cm)	含水率(%)
F1	普光寺	小屋梁	125年	からまつ		○	313	30.8	15.9
FF1		小屋梁		からまつ		○	438	27.0	
F3-1		小屋梁		からまつ		○	470	32.0	
F4		柱		すぎ		□	470	17.0x17.0	
FF4		柱		すぎ		□	267	16.8x16.8	
F6		大引き		からまつ		□	267	18.0x15.0	
FF6		大引き		からまつ		□	220	17.5x14.5	
C3	長昌禅寺	大引き	255年	からまつ		□	220	19.0x16.0	
C4		小屋梁		からまつ		○	369	23.5	13.2
CC4		小屋梁		からまつ		○	360	25.3	
C2-2		柱		けやき		○	419	25.0	
C6		柱		からまつ		□	412	15.0x15.0	
TA	東光寺	梁	269年	あかまつ	切欠き	□	896	32.7x24.3	19.2
TB		梁		あかまつ	割れ	○	587	28.2x27.7	12.8
TC		梁		あかまつ	ほぞ穴	○	500	25.0x25.0	7.8
TD		梁		あかまつ	ほぞ穴	○	395	24.0x24.5	8.4
TE		梁		あかまつ	節	○	595	33.0x28.5	9.0
T1		柱		あかまつ	貫穴	□	364	14.0x13.9	13.0
T4		柱		あかまつ	割れ	□	337	17.8x17.9	13.0
HA	法雲寺	梁	280年	あかまつ	切欠き	○	668	26.3x27.0	12.0
HB		梁		あかまつ	切欠き	□	538	19.0x17.0	8.0
H3		柱		あかまつ	節	□	381	17.7x18.0	14.5
H8		柱		あかまつ	切欠き	□	343	14.7x14.5	14.0
H10		柱		あかまつ	節	□	274	17.7x17.8	17.0
H12		柱		あかまつ	割れ	□	316	17.3x18.2	15.4
今回	玄江院	柱	298年	けやき	切欠き	○	460	26.3	8.4



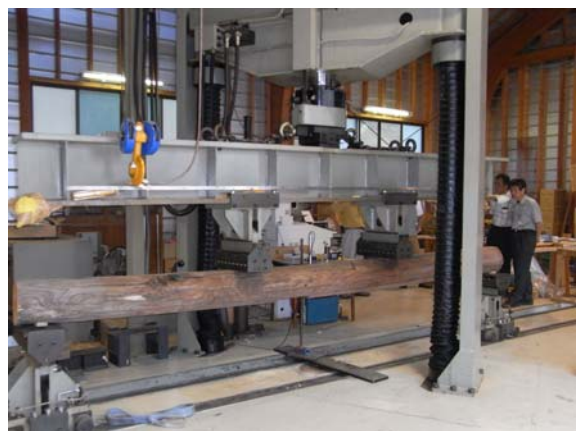
解体前の玄江院



解体中の玄江院



実験に供したケヤキ柱材



曲げ試験



破壊後 1



破壊後 2

写真 6. 7. 4-1 玄江院とケヤキ古材の実大曲げ試験

6. 7. 5 まとめ

(1) 木造建築物などの構造体に組み込まれた状態の部材（木材）に対して、「応力波伝播速度」のみを測定することで部材のヤング率を推定するための新しい方法を提示した。この方法によれば、材料の密度を知ることなくヤング率を推定することができる。

(2) 社寺建築を中心に、経年使用された構造部材のヤング率について、2004 年から開始した非破壊検査の概要を整理した。建築物は調査の時点で築 70～300 年の寺院（本堂、庫裏、山門、集会施設）13 件、社殿 1 件、民家 2 件の計 16 件である（平成 23 年 2 月現在）。測定本数は延べ 723 本であり、また、測定部材は、梁 321 本、柱 222 本、登り梁 50 本、束柱 5 本、その他 99 本である。柱部材の樹種はアカマツ、カラマツ、ヒノキが多く、この他にスギ、ツガ、カツラ、ケヤキがあった。古材の繊維方向の応力波伝播速度は 4000～5000 (m/s)程度が多く、平均値±標準偏差は 4646 ± 487 (m/s) であった。これより、推定したヤング率とアカマツ（新材）の基準弾性係数を比較すると、 E_0 (10.0GPa) 以上のデータの割合は 55.6%であり、一方、 $E_{0.05}$ (6.5GPa) を下回るデータの割合は 3.7%であった。

(3) 解体した古建築部材に関して実大曲げ試験を行った。供試材を採取した部位は梁、柱、大引で、樹種はツガ、アカマツ、カラマツ、ケヤキ、スギであった。曲げヤング率と曲げ強さとの関係を、既往のデータとあわせて示したものが図 6.7.4-1 で、曲げ強さは「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」機械等級製材の繊維方向特性値に示される曲げの基準材料強度 (F_b 値) を概ね上まわるものであった。