

伝統木造建築物に用いられた古材の強度劣化

および劣化非破壊検査法

Strength deterioration and nondestructive test of old wooden members in traditional structure

大岡優¹・安里祐二¹・伊津野和行²・土岐憲三³

Yu Ooka, Yuji Yasuzato, Kazuyuki Izuno, Kenzo Toki

¹立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate student, Science and Engineering, Ritsumeikan University

²立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

³立命館大学教授 グローバルイノベーション研究機構 (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Professor, Ritsumeikan University, Global Innovation Organization

This paper examined the strength test for old wooden members and nondestructive test using electromagnetic radiation. The value of the strength tests were compared with the prescribed value in the handbook for Japanese industrial wood. The strength of Japanese cypress for 374 years after it is used as a structural member is larger than the prescribed value in the handbook. The bending strength of zelkova for 15 years after it is used as a structural member is smaller than the prescribed value. Furthermore, the electromagnetic radiation test was able to find the presence of internal loss of wooden column, however, accurate shape and position were difficult to be identified.

Key Words : *old wooden members, nondestructive test, nonlinear earthquake analysis*

1. はじめに

寺社仏閣を代表とする伝統木造建築物は、我が国が世界に誇れる文化遺産であり、国民全員の貴重な財産である。その存在は我々の日常生活に安らぎと精神的豊かさをもたらしている。日本は世界でも有数の地震多発国である。したがって、伝統木造建築物を地震から保護し、後世に健全な形で継承していくことが重要となってくる。

伝統木造建築物の耐震性能に影響を与える要因として経年変化がある。経年変化には、経年による部材強度の変化や虫害・腐朽による生物的劣化などがある。伝統木造建築物の構造材となる木材はヒノキ、マツ、ケヤキなどと多種であるが、広葉樹のケヤキと針葉樹のヒノキでは経年による強度変化の仕方が異なるという研究報告¹⁾がある。それによると、ケヤキは構造材となつてからすぐに強度低下が始まるが、ヒノキは構造材となつてから数百年は強度が上昇し、その後緩やかに低下するとされている。また、255年経過したケヤキの構造材は、新材に比べヤング係数が約15~20%程度低下するが、約300年経過したアカマツのヤング係数は新材に比べ上昇しているという実験結果もある^{2)~4)}。このように、樹種ごとに経年による強度特性が異なるという研究報告があるが、データの少なさから正確な古材の強度特性についてはいまだ明らかにされていない。また、虫害や腐朽等によって引き起こされる柱内部欠損も伝統木造建築物の耐震性能に大きな影響を及ぼす可能性があるが、外観からの判断が困難である。したがって、内部欠損の存在を把握できないうちに、取り返しがつかないほど劣化が進行しているということもありうる。現在、柱内部欠損の把握方法と

して有効なのが、放射線透過試験（X線検査）やピロディンによるものである。しかし、これらの方法は、誰もが簡単に行うことができなかつたり、建物を傷つけてしまうなどの欠点がある。

これらの伝統木造建築物と経年変化との関係に対し、本研究では、清水寺で使用されていたケヤキとヒノキ古材を用いた強度試験を行い、古材の強度特性の把握を行うとともに、電磁波レーダーを用いた柱内部欠損の非破壊検査手法の有効性について検討した。

2. 古材の強度試験

(1) 概要

古材の強度特性の把握を目的とし、縦圧縮試験、曲げ試験の2つの強度試験を行った。強度試験に用いた試験体は、清水寺で使用されていた、ケヤキおよびヒノキの古材である。ケヤキ古材は2004年9月に行われた清水寺本堂の舞台張替え工事の際に採取したもので、舞台床下の横架材の一部である。ヒノキ古材は清水寺奥の院(1633年建造)で舞台修理工事を実施した際に採取した、舞台柱の一部である。古材の諸元を表1に示す。古材の樹齢は加速器分析研究所による放射線炭素年代測定によるものである。

表1 古材の諸元

樹種	種別	樹齢	構造材年数	採取場所	古材の状態
ケヤキ	広葉樹	220年	15年	本堂舞台下	腐朽による劣化あり
ヒノキ	針葉樹	720年	374年	奥の院	シロアリによる内部欠損あり

(2) 縦圧縮試験

a) 試験方法

縦圧縮試験は JISZ2101 の「縦圧縮試験」に準拠し試験を行った。試験体は表1に示す古材から健全な部分を切り出し、図1、写真1に示すような断面4cm×4cm、長さ8cmの試験体を12個ずつ作成した。試験体は、長手方向を繊維方向に平行にし、その両断面を長手方向に垂直かつ平行にするようにした。また、ケヤキ古材の試験体をA~L、ヒノキ古材の試験体をa~lと区分した。その後、ひずみ計測のため試験体にひずみゲージを取り付けた。ひずみゲージは圧縮時のねじれを考慮し、1個の試験体に2つ取り付けた。

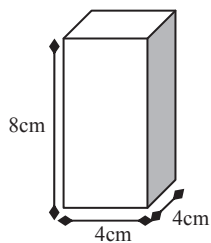


図1 試験体寸法



写真1 試験体

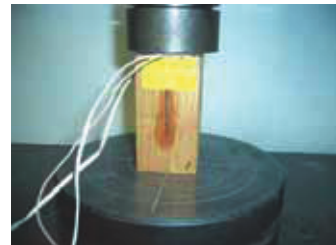


写真2 試験の状況

b) 試験結果

縦圧縮試験より得られたケヤキ古材とヒノキ古材の応力-ひずみ曲線の代表的なものを図2、図3に、表2に各試験体の質量、密度、含水率、縦圧縮ヤング係数、縦圧縮強さの結果を示す。ひずみは、試験時のねじれを考慮し、1個の試験体で得られた2つのデータを平均した。

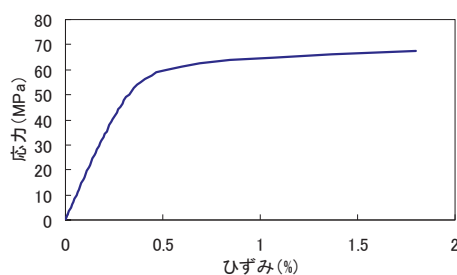


図2 ケヤキ古材の応力-ひずみ曲線

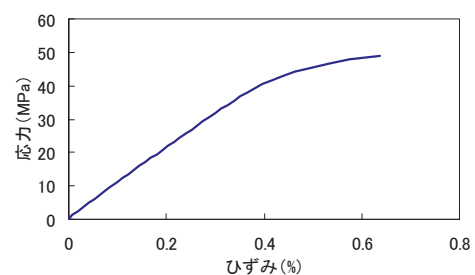


図3 ヒノキ古材の応力-ひずみ曲線

表2 試験結果

	質量 (g)	密度 (g/cm ³)	含水 率(%)	縦圧縮ヤング 係数(GPa)	縦圧縮強 さ(MPa)		質量 (g)	密度 (g/cm ³)	含水 率(%)	縦圧縮ヤング 係数(GPa)	縦圧縮強 さ(MPa)
ケヤキA	98	0.77	10.1	15.0	68.6	ケヤキB	93	0.73	10.7	18.3	68.8
ケヤキC	90	0.70	11.1	16.8	65.5	ケヤキD	81	0.63	12.5	13.4	55.1
ケヤキE	95	0.74	10.5	17.5	67.9	ケヤキF	80	0.63	11.1	13.1	52.6
ケヤキG	95	0.74	10.5	12.8	66.8	ケヤキH	88	0.69	12.8	13.8	65.0
ケヤキI	80	0.63	12.7	11.8	53.3	ケヤキJ	99	0.77	11.2	17.9	70.1
ケヤキK	90	0.70	11.1	12.1	68.5	ケヤキL	91	0.71	12.3	13.0	70.3
ケヤキ平均	90	0.70	11.4	14.6	64.4						
ヒノキa	56	0.44	9.8	10.2	49.5	ヒノキb	57	0.45	11.8	10.5	48.0
ヒノキc	59	0.46	13.5	8.6	47.8	ヒノキd	58	0.45	11.5	10.5	52.9
ヒノキe	58	0.45	13.7	13.1	50.6	ヒノキf	56	0.44	12.0	12.7	51.7
ヒノキg	58	0.45	11.5	14.0	55.1	ヒノキh	57	0.45	11.8	10.9	53.0
ヒノキi	59	0.46	11.3	12.8	51.1	ヒノキj	58	0.45	11.5	11.0	51.5
ヒノキk	56	0.44	9.8	11.0	50.1	ヒノキl	58	0.45	11.5	13.4	54.2
ヒノキ平均	58	0.45	11.5	11.6	51.3						

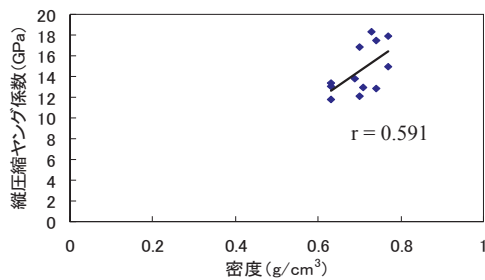
図2、図3のケヤキ古材の応力-ひずみ曲線とヒノキ古材の応力-ひずみ曲線を比較すると、ケヤキ古材の方が、降伏してから亀裂が生じ力を受けもたなくなるまでねばりがあり、靱性があることがわかった。それに対しヒノキ古材の方は、降伏してからすぐに亀裂を生じ力を受けもたなくなる試験体が多かった。

表2の試験結果では、ケヤキ古材の縦圧縮ヤング係数は11.8GPa～18.3GPaと試験体によるばらつきが大きかった。平均値は14.6GPaだった。縦圧縮強さも縦圧縮ヤング係数と同様に52.6MPa～70.3MPaと試験体によるばらつきが大きかった。平均値は64.4MPaとなり、木材工業ハンドブック⁵⁾に掲載されている値50MPaより29%程度大きかった。

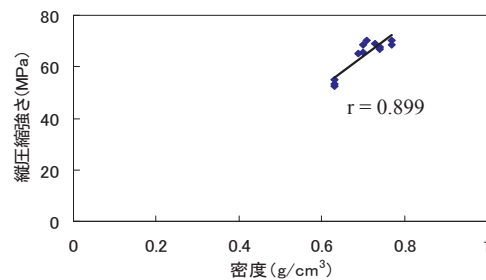
ヒノキ古材の縦圧縮ヤング係数は、ケヤキ古材ほど試験体によるばらつきは大きくなかったが、それでも8.6GPa～14.0GPaと試験体によるばらつきがあった。平均値は11.6GPaだった。縦圧縮強さは、試験体によるばらつきはほとんどなく、平均値は51.3MPaであった。この値はハンドブックの値40MPaより28%大きい値となった。結果にばらつきが出たのは、木材はもともと部位による強度差が大きいことに加え、劣化部材の各所から試験体を作成したことが原因であると考えられる。

試験前と試験後の試験体の様子においては、ケヤキ古材、ヒノキ古材ともに試験前も試験後も試験体の形状に大きな変化は見られなかった。試験後の試験体を注視すると、どちらともにわずかな亀裂がある試験体が多かった。したがって、実際の構造材となっている部材は外観からの目視で安易に健全であるとは断定できないと考えられる。

次に、縦圧縮試験結果から、ケヤキ古材とヒノキ古材の密度と縦圧縮ヤング係数、縦圧縮強さとの相関関係を調べた。図4と図5に相関図を示す。図中のrは相関係数で、0.6以上であれば相関が高いといえる。

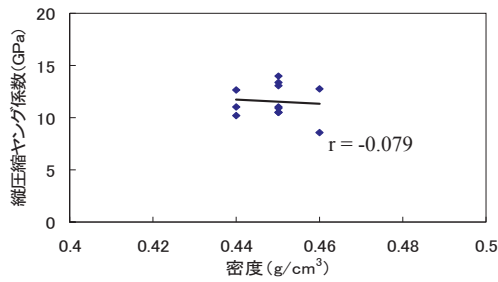


(a) 密度と縦圧縮ヤング係数

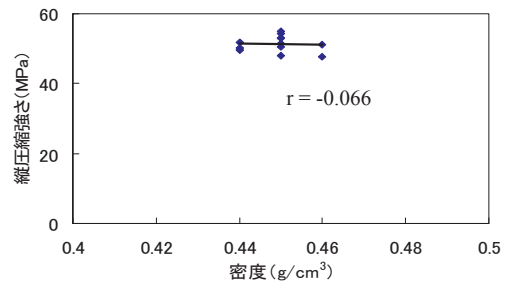


(b) 密度と縦圧縮強さ

図4 ケヤキ古材における相関関係



(a) 密度と縦圧縮ヤング係数



(b) 密度と縦圧縮強さ

図5 ヒノキ古材における相関関係

図4、図5より、ケヤキ古材における密度と縦圧縮ヤング係数、縦圧縮強さとの間にはある程度高い相関関係があることがわかった。ヒノキ古材においては密度と縦圧縮ヤング係数、縦圧縮強さとの間に高い相関関係はみられなかった。ケヤキ古材における密度と縦圧縮ヤング係数、縦圧縮強さとの相関が大きかったことから、部材の密度を把握することが出来たら、その部材の強度を推定できる可能性がある。非破壊的な計測の例では、電磁波レーダーで比誘電率を計測し、それから密度、強度を推定するという方法が考えられる。

(2) 曲げ試験

a) 試験方法

曲げ試験は JISZ2101 の「曲げ試験」に準拠し試験を行った。試験体は表1に示す古材から、図6、写真3に示すような断面 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 、長さ 32cm の試験体を作成した。試験体は、長手方向を繊維方向に平行にした。また、ケヤキ古材の試験体を A~Q、ヒノキ古材の試験体を a~k と区分した。試験体の中には腐朽や虫害による劣化が確認されているものもあり、健全なものと思われる試験体との比較も行った。ケヤキにおいては、A~L が健全材、M~Q が劣化材である。ケヤキ古材の劣化は腐朽によるひび割れが主なものであった。ヒノキ古材については、a~c が健全材、d~f が軽度の劣化、g~k が重度の劣化となっている。ヒノキ古材の劣化は虫食いによる穴が開いているものであった。なお、軽度の劣化とは、腐朽や虫食いによる欠損が試験体表面の約 5%程度を占めるもの、重度の劣化とは表面の約 30%程度を占めるものとした。試験時における試験体中央部のたわみは写真4に示す変位計で計測した。

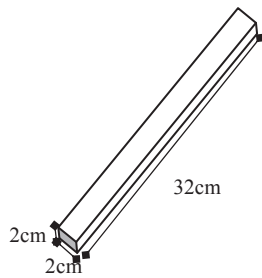


図6 試験体寸法



写真3 試験体



写真4 試験の状況

b) 試験結果

曲げ試験より得られたケヤキ古材とヒノキ古材の荷重-変位曲線の代表的なものを図7、図8に、表3に各試験体の質量、密度、含水率、曲げヤング係数、曲げ強さ、劣化状況の結果を示す。

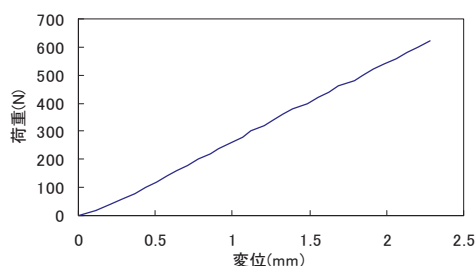


図7 ケヤキ古材の荷重-変位曲線

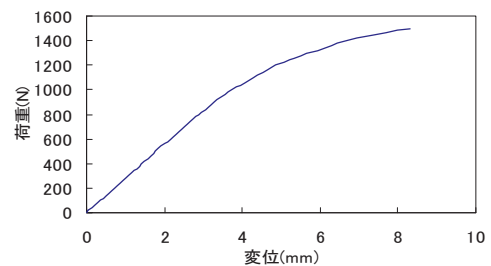


図8 ヒノキ古材の荷重-変位曲線

表3 試験結果

	質量 (g)	密度 (g/cm ³)	含水 率(%)	曲げヤング係 数(GPa)	曲げ強 さ(MPa)	劣化状 況		質量 (g)	密度 (g/cm ³)	含水 率(%)	曲げヤング係 数(GPa)	曲げ強 さ(MPa)	劣化状 況
ケヤキA	78.0	0.61	9.7	8.5	17.9	健全	ケヤキB	76.9	0.60	9.9	9.3	26.5	健全
ケヤキC	82.6	0.65	10.0	10.2	29.4	健全	ケヤキD	78.2	0.61	10.0	9.8	33.6	健全
ケヤキE	84.6	0.66	10.0	11.5	104.0	健全	ケヤキF	82.0	0.64	10.5	10.6	31.5	健全
ケヤキG	80.3	0.63	10.2	11.1	42.0	健全	ケヤキH	78.1	0.61	10.0	10.6	38.1	健全
ケヤキI	77.6	0.61	10.4	9.6	36.2	健全	ケヤキJ	74.4	0.58	10.4	8.1	26.3	健全
ケヤキK	74.5	0.58	10.4	8.8	33.6	健全	ケヤキL	79.0	0.62	10.2	10.1	33.6	健全
ケヤキ平均 (健全)	78.9	0.62	10.1	9.9	37.7								
ケヤキM	62.5	0.49	10.8	4.1	5.5	劣化大	ケヤキN	59.8	0.47	10.3	3.3	10.5	劣化大
ケヤキO	72.0	0.56	9.9	3.3	7.4	劣化小	ケヤキP	65.0	0.51	10.4	5.7	12.1	劣化小
ケヤキQ	72.4	0.57	10.2	7.5	23.1	劣化小							
ケヤキ平均 (劣化)	66.3	0.52	10.3	4.8	9.0								
ヒノキa	56.5	0.44	11.2	9.2	78.8	健全	ヒノキb	56.6	0.44	11.0	8.7	67.7	健全
ヒノキc	54.8	0.43	11.4	9.3	79.8	健全							
ヒノキ平均 (健全)	56.0	0.44	11.2	9.1	75.4								
ヒノキd	64.9	0.51	11.1	9.8	60.9	劣化小	ヒノキe	56.3	0.44	11.3	8.2	42.0	劣化小
ヒノキf	54.1	0.42	11.3	9.2	54.6	劣化小							
ヒノキ平均 (劣化小)	58.4	0.46	11.2	9.1	52.5								
ヒノキg	59.2	0.46	11.5	7.7	46.7	劣化大	ヒノキh	54.5	0.43	11.5	不定	15.8	劣化大
ヒノキi	56.5	0.44	11.7	7.7	41.5	劣化大	ヒノキj	50.8	0.40	11.4	5.6	18.9	劣化大
ヒノキk	59.5	0.46	11.6	不定	28.4	劣化大							
ヒノキ平均 (劣化大)	56.1	0.44	11.5	7.0	30.2								

図7、図8のケヤキ古材の荷重-変位曲線とヒノキ古材の荷重-変位曲線に代表されるように、ケヤキ古材の方は、塑性域に入る前に亀裂が生じ力を受けもたなくなる試験体がほとんどであった。それに対しヒノキ古材の方は、塑性域に入ってから亀裂を生じ力をうけもたなくなる試験体が多かった。

表3の試験結果より、健全であるケヤキ古材の曲げヤング係数の平均は9.9GPaとハンドブックの値12.0GPaより18%程度低下した。曲げ強さの平均値は37.7MPaとなり、ハンドブックの値100MPaより62%程度小さくなった。劣化しているケヤキ古材においては、曲げヤング係数の平均値は4.8GPa、曲げ強さの平均9.0MPaとなり、健全なケヤキ古材に比べ大きく低下した。

健全であるヒノキ古材の曲げヤング係数の平均9.1GPaと曲げ強さの平均75.4MPaはハンドブックの値とほぼ同じ値になった。劣化しているヒノキ古材においては、劣化が軽い場合においては、曲げヤング係数の平均値は健全な古材の値と同じであったが、曲げ強さの平均値は健全なヒノキ古材の値より31%程度低下した。劣化が重度の場合においては、曲げヤング係数の平均値は7.0GPa、曲げ強さの平均値は30.2MPaとなり、健全な古材、軽度の劣化の場合と比較して強度が大きく低下した。

劣化の影響については、ケヤキ古材の腐朽による強度低下が顕著であった。曲げ試験結果から、ケヤキ古材(健全なA~L)とヒノキ古材(a~f)における密度と曲げヤング係数、曲げ強さの相関関係を調べた結果を図9、図10に示す。

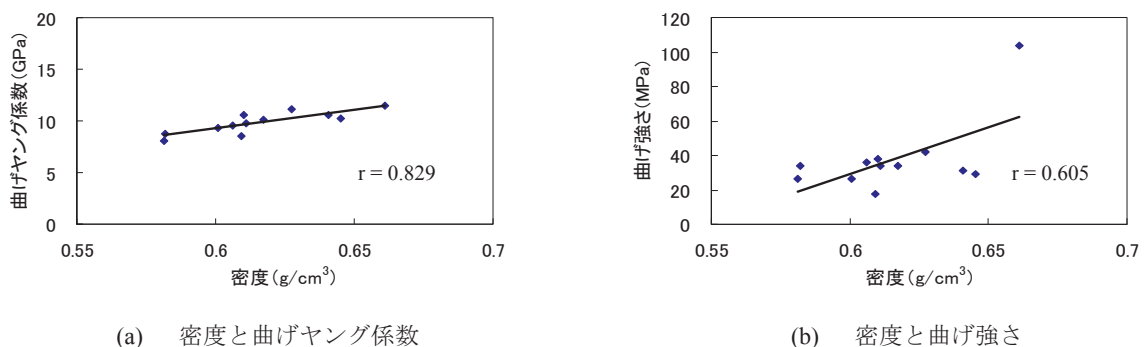


図9 ケヤキ古材における相関関係

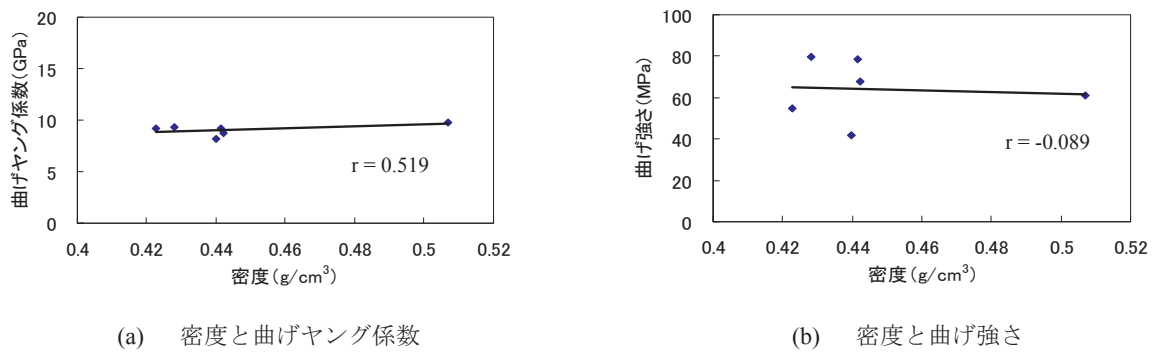


図 10 ヒノキ古材における相関関係

図 9 より、ケヤキ古材における密度と縦圧縮ヤング係数、縦圧縮強さとの間には高い相関関係があることがわかった。それに対し、図 10 のヒノキ古材においては、密度と曲げヤング係数との間にはある程度高い相関がみられたが、密度と曲げ強さにおいては高い相関はみられなかった。

3. 電磁波レーダーによる柱内部欠損把握

(1) 概要

腐朽・虫害による柱内部欠損は、外観からの判断が困難で、その非破壊検査手法はいまだ確立されていない。したがって本章では、携帯型電磁波レーダーを用いた実験によって、内部欠損の把握は可能かどうか検討した。実験に使用した電磁波レーダーはCOS社製の「SENCION PRO3」である。この電磁波レーダーを使用し、内部欠損を仮定した空洞を持つ試験体と清水寺奥の院の劣化柱に対して実験を行った。さらに今回の電磁波レーダーで把握できる程度の柱内部欠損が、清水寺本堂の耐震性能に与える影響を、非線形地震応答解析によって検討し、電磁波レーダーの有効性について検討した。

(2) 実験結果

試験体を用いた実験における、内部欠損が存在しない断面と内部欠損が存在している断面の実験結果を図 11 に示す。なお、試験体寸法は直径30cm、高さ50cmの丸太に直径10cm、高さ25cmの空洞を空けたものである。

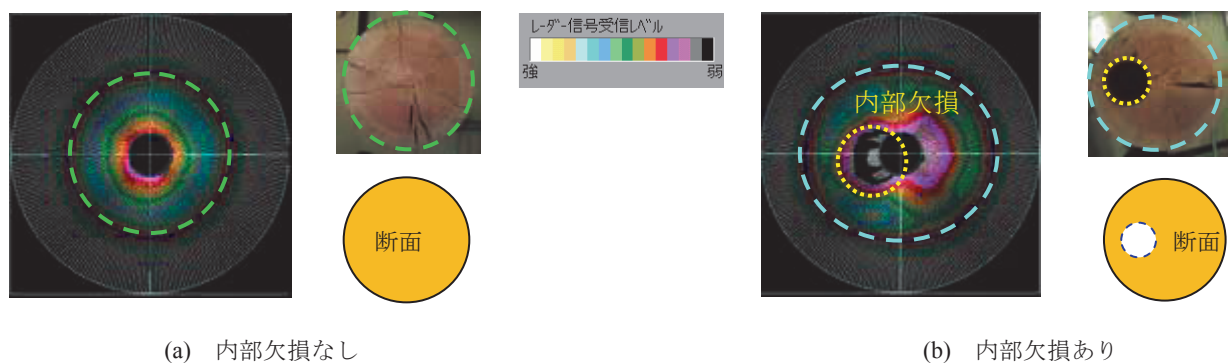


図 11 試験体を用いた実験結果

図11の内部欠損がない場合とある場合の画像を比較すると、内部欠損がある画像の方は、黄色の点線で示した内部欠損周辺箇所 signals レベルが非常に弱くなっていることがわかる。信号レベルの弱まる箇所は、内部欠損の位置を変えることによって、その都度、内部欠損の位置周辺に出ることから、この試験体程度の大きさの内部欠損であれば、存在の把握が可能であることがわかった。しかしながら、正確な大きさと形状については把握が困難であった。

図12に清水寺奥の院の劣化柱に対して行った実験結果を示す。劣化柱は断面35cm×35cm、高さ40cmの角柱に約20cm×10cm程度の内部欠損が存在しているものである。なお、健全な角柱を対象とした場合においては、実験結果の図においても角柱の断面形状で表示される。しかし、本実験においては図12の水色の点線が

示すように試験体と実験結果の図が対応しなかった。これは、柱の表面が劣化によって平坦ではなかったために、実験時に電磁波装置を試験体に密着させることができなかったことが原因である。図12をみると、図11の試験体と同様に、黄色の点線で示した内部欠損が存在する箇所において、信号レベルが非常に弱くなっていることがわかる。その大きさも、図11と比較して大きくなっていることから、電磁波レーダーによってある程度の内部欠損の大きさ、位置は把握できることがわかった。



図12 奥の院の劣化柱を用いた実験結果

(3) 電磁波レーダーの有効性について

本研究の電磁波レーダーによる実験結果において、電磁波レーダーで把握できる程度の大きさの内部欠損が、清水寺本堂の耐震性能にどのような影響を与えるのかを非線形地震応答解析によって検討した。本章では、清水寺本堂の全ての柱において、風雨にさらされやすい懸造部の柱脚と柱頭、本堂部の柱脚の局部に断面積50%の内部欠損が存在している場合（局部劣化）、その状態から劣化が進行し、柱脚から柱頭まで断面積50%の内部欠損が貫通している場合を仮定した。なお、断面積50%とは、舞台柱で約50cmφ、本堂柱で約40cmφの大きさで、電磁波レーダーで十分把握可能な大きさだと考えられる。数値解析モデルと数値計算方法は既往の研究⁶⁾によるものを基本とする。数値解析に用いた入力地震波はJMA神戸50kine基準化波形とした。JMA神戸50kine基準化波形は、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録の波形を、極めて稀に発生する大地震として最大速度50kineに基準化したものである。内部欠損の存在によって解析モデルで変更される主な箇所は、柱と貫の接合部である。柱と貫の接合部には、地震時に発生するめり込み抵抗モーメントによる回転バネを設定している。しかし、内部欠損が柱内部に存在していると、図13のように、めり込む体積が小さくなり、バネ性能が低下することになる。柱内部欠損を考慮したときの固有値解析結果を表3に、非線形地震応答解析結果を図14に示す。

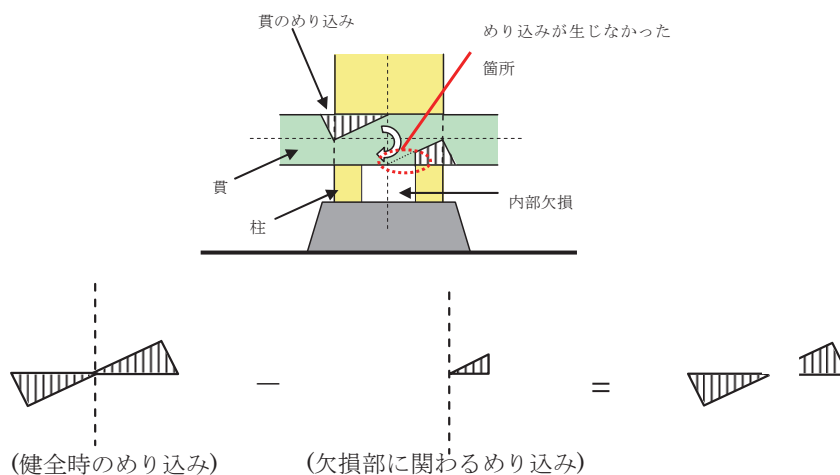


図13 接合部のめり込み

表3 固有値解析結果

	健全	内部欠損 50% (局部)	内部欠損 50% (貫通)
1次 (南北)	0.599	0.603	0.656
2次 (東西)	0.521	0.538	0.592
3次 (ねじれ)	0.268	0.270	0.271

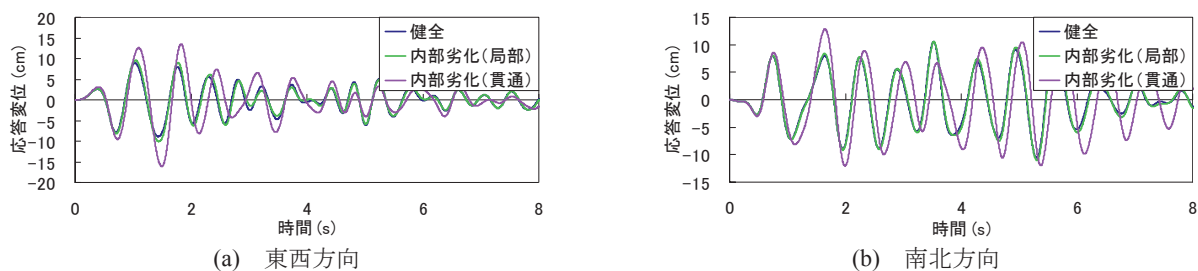


図14 地震応答解析結果

図14をみると、内部欠損が柱を貫通するほど劣化が進行した場合においては、東西方向で最大応答変位が約80%上昇、南北方向で約17%上昇した。しかし、内部欠損が柱脚や柱頭の一部であると仮定した場合には、応答変位に大きな変化はなかった。この結果から、清水寺本堂においては、建物の耐震性能に影響を与えるほどの内部欠損は、手遅れになる前に電磁波レーダーで十分に把握することができる結果となった。しかし、古材の強度試験結果から示すとおり、一見健全でも、腐朽していると強度がほとんどないことをふまえ、しっかりとした劣化対策を行っていくことが重要である。また、この結果は清水寺本堂に対するものであり、他の伝統木造建築物においては、本章で行った数値解析と異なる結果も考えられる。

4. 結論

本研究では、古材の強度特性の把握を目的に、ケヤキ古材（樹齢220年、構造材年数15年）とヒノキ古材（樹齢720年、構造材年数374年）を対象とした縦圧縮試験、曲げ試験をおこなった。さらに、電磁波レーダーによる柱内部欠損の非破壊検査法の有効性について検討した。本研究で明らかになったことを以下に示す。

- 1) 縦圧縮試験の結果、縦圧縮強さは、木材工業ハンドブックの値と比較して、ケヤキ古材の値は 29%、ヒノキ古材の値は 28%大きい値であった。
- 2) 曲げ試験の結果、曲げヤング係数、曲げ強さともに、ハンドブックの値と比較して、ケヤキ古材の値は小さくなったが、ヒノキ古材の値は変わらなかった。
- 3) 腐朽したケヤキ古材の曲げヤング係数、曲げ強さは健全材に比べ、かなり小さな値であった。
- 4) 虫食いが少ないと、ヒノキ古材の曲げヤング係数、曲げ強さの低下に大きな影響はないが、虫食いが多いと大きな影響を与えることがわかった。
- 5) 10cmφ以上の大きさの内部欠損であれば、電磁波レーダーで把握可能であることがわかった。
- 6) 清水寺本堂においては、電磁波レーダーによる柱内部欠損調査の有効性が示された。

謝辞：本研究を行うにあたり、古材の樹種鑑定に関して京都大学杉山淳司教授、立命館大学鈴木祥之教授、強度試験に関して立命館大学井上真澄助教の協力を得たことに深く感謝の意を表します。さらに、研究を行うにあたって協力をしてくださった清水寺に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西岡常一、小原二郎：法隆寺を支えた木、NHKブックス、1978年。
- 2) 平島義彦、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、Vol.50、2004年、pp.301-309。
- 3) 平島義彦、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2報)ケヤキおよびアカマツの圧縮強度特性、せん断強さおよび硬さ、木材学会誌、Vol.50、2004年、pp.368-375。
- 4) 平島義彦、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3報)ケヤキおよびアカマツの静的曲げ強度特性および衝撃曲げ強さ、木材学会誌、Vol.51、2005年、pp.146-152。
- 5) 木材工業ハンドブック：森林総合研究所 改定4版、2004年3月。
- 6) 鈴木隆志、倉形雅之、伊津野和行、土岐憲三：懸造形式を有する伝統木造建築物の地震応答に舞台が与える影響、日本地震工学会論文集、第7巻、第5号、2007年、pp.15-30。