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[†]

森 拓 郎* 築 瀬 佳 之** 田 中 圭***
河 野 孝太郎*** 野 田 康 信**** 森 満 範****
栗 崎 宏***** 小 松 幸 平*****

Evaluation of Compression and Bending Strength Properties of Wood Damaged from Bio-Deterioration

by

Takuro MORI*, Yoshiyuki YANASE**, Kei TANAKA***, Kotaro KAWANO***,
Yasunobu NODA****, Mitsunori MORI*****, Hiroshi KURISAKI***** and Kohei KOMATSU*****

It is the aim of this study to evaluate the surviving strength of bending or full compression of wood damaged by bio-deterioration. The bending or the full compression performance of the Sugi and Todomatsu specimens damaged by termite attack or brown-rot fungal attack was evaluated, and the threshold value ensuring the standard strength was also investigated. As the results, we suggested that penetration depth of 25mm in the case of Pilodyn®, regardless of the wood species and the type of bio-deterioration, was appropriate as the threshold value in this research. It was also suggested that the enough residual strength was not obtained in the case of the ultrasonic velocity of below 5000m/s for the longitudinal direction in the bending test. But it was difficult to decide the threshold value using the ultrasonic velocity for the tangential direction in the full compression test.

Key words : Compression strength, Bending strength, Termite, Brown rot fungus, Surviving strength

1 緒 言

木材の利用による炭素固定が注目される中、木材・木質材料を用いた住宅の長期使用は、都市における炭素固定として重要である。このため、これらの木材・木質材料の耐久性が確認されていることや劣化を受けた材料の残存耐力が正しく評価できることは建物を使い続ける上で必要な要因となる。しかし現状では、これらの残存耐力を評価する手法は確立されていない。特に、木材・木質材料にとって劣化速度の速い生物劣化については、十分なデータが揃っているとは言い難い。そのため、木材および木質材料を用いた建物の補改修等にマニュアルとして用いられる、「木造住宅の耐震診断と補強方法」²⁾、「実務者のための住宅の腐朽・虫害の診断マニュアル」³⁾および「木造住宅の耐久設計と維持管理・劣化診断」⁴⁾においても、マイナスドライバーによる穿孔や触診などの劣化度の評価方法が紹介されているのみであり、未だ十分な検討が行われているとは言い難い。そのため、生物劣化を受けた木材・木質材料の残存耐力は、既存建物の耐震改修や補強方法を提案していく中で重要となるが、

正確に把握することは困難となっている。既往の生物劣化を受けた木材と残存耐力の関係についての研究は、木材腐朽に関して薬剤の耐久性を述べる実験的研究⁵⁾は行われているものの残存耐力を調べるための研究は少なく⁶⁾、シロアリ食害とその残存耐力については、野口らの研究⁷⁾や大村らの研究⁸⁾や筆者らの研究⁹⁾などがみられる。建物調査と関連したものとしては、生瀬らの研究¹⁰⁾などがあるが十分とはいえず、工学的に残存耐力を把握するには至っていない。

そこで本研究では、シロアリによる食害を受けた木材、および褐色腐朽菌により腐朽を受けた木材の残存耐力と、劣化度を評価するための機器による測定値を比較し、それと残存耐力との相関関係を評価するとともに、残存強度評価のための閾値について検討する。本報告では、曲げおよび全面圧縮試験の結果について述べる。なお、建物内においては、木材腐朽とシロアリ食害は連動して発生していることも多いが、耐力低下の要因がそれぞれセルロースなどの分解と空隙という異なるものと考え、木材腐朽とシロアリ食害を個別に扱うこととする。

本論文の一部は文献 1) にて発表しており、修正と新たな考察を加えて加筆したものである。

[†] 原稿受理 平成 24 年 8 月 17 日 Received Aug. 17, 2012 ©2013 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 京大生研 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 宇治市五ヶ庄, Res. Inst. for Sustainable Humansphere, Kyoto Univ., Gokasho, Uji, 611-0011

** 正 会 員 京大農研 京都大学大学院農学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Graduate School of Agri., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

*** 大分大学工学部福祉環境工学科 〒870-1192 大分市大字旦野原, Faculty of Eng., Oita Univ., Dannoharu, Oita, 870-1192

**** 地方独立行政法人北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場 〒071-0198 旭川市西神楽, Forest Products Res. Inst., Hokkaido Res. Organization, Nishikagura, Asahikawa, 071-0198

***** 富山県農林水産総合技術センター木材研究所 〒939-0311 射水市黒河新, Forest Products Res. Inst., Toyama Prefectural Agricultural, Forestry and Fisheries Res. Center, Kurokawashin, Imizu, 939-0311

***** 京大生研 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 宇治市五ヶ庄, Res. Inst. for Sustainable Humansphere, Kyoto Univ., Gokasho, Uji, 611-0011

2 試験体調製

2.1 試験体概要

Fig. 1 に各試験体形状および寸法を示す。試験体には、スギ (*Cryptomeria japonica*)、トドマツ (*Abies sachalinensis*) を用い、それぞれを「心材のみのもの」と「辺材を含むもの」とに分けた。以後、スギの心材のみのものを SH, 辺材を含むものを SS, トドマツの心材のみのものを TH, 辺材を含むものを TS とする。また、シロアリによる食害を進行させた試験体を蟻害試験体、腐朽菌による腐朽を進行させた試験体を腐朽試験体と呼ぶ。まず、両樹種とも複数本の丸太から 50mm × 50mm × 1,500mm 程度の角材を切り出した。ただし、何本の丸太および製材から取り出したかは不明である。つぎに、密度、ヤング係数の測定、ならびに各種劣化評価機器による健全値計測を行った後、なるべく節が入らないように曲げおよび全面圧縮試験用にそれぞれの試験体を製作した。

2.2 生物劣化操作

2.2.1 シロアリの食害操作 シロアリによる食害は、和歌山県煙樹ヶ浜の松林にて実施した。本試験を行うに際して、先にイエシロアリ (*Coptotermes formosanus*) を試験箇所に寄せてから食害試験を開始するため、地面に杭を打ち込み、その上に試験体を設置してシロアリが試験体を食害しやすいように考慮した (Fig. 2)。また、試験体は箱で覆うなど、シロアリが活動しやすい環境で食害させた。食害の進行状況は目視により確認し、食害の激しいものや軽微なもの、さまざまな試験結果が得られるように選別した。

2.2.2 腐朽操作 腐朽操作は、富山県農林水産総合技術センターおよび北海道立総合研究機構林産試験場において実施した。曲げ試験体においては、70% エチルアルコールで表面を滅菌した試験体の中央部 (約 100mm) にオオウズラタケ (*Fomitopsis palustris*) が蔓延した培養基を接触させ、温度 27℃ で 2 ~ 8 週間培養して強制腐朽させた。なお、培養基は、スギについてはパーミキュライト + 培養液を、トドマツについてはポテトデキストロース寒天培地をそれぞれ用いた。全面圧縮試験体においても同様に、エチレンオキサイドガスで滅菌したスギおよびトドマツをそれぞれの培地に設置することで、強制腐朽させた。腐朽期間などは曲げ試験体と同様であり、強制腐朽操作を終えた試験体は、試験体表面に付着した菌糸などを水で洗い流し、実験室内で 2 ヶ月間以上保管し、これを気乾状態とみなした。

Fig. 1 Configuration of specimens (Unit in mm).

Fig. 2 State of specimen which attacked by termite on site.

Fig. 3 Stage of decay by *F. palustris* (left : full compression specimens, right: bending specimens).

Fig. 4 Dr. Wood and Pilodyn (left : Dr. Wood, right : Pilodyn).

2.3 生物劣化前後の測定項目

本研究で劣化度を評価するために用いた測定機器は超音波伝播速度測定器 (AKITA SKK 社製 Dr. Wood) および打ち込み深さ測定器 (エフティーエス社製 Pilodyn; 打ち込みエネルギー 6.0J) である。なお、すべての材料において計測は気乾状態にて実施した。

超音波伝播速度測定器は、丸太材や角材などの測定部に送信および受信探触子押し付け測定する。超音波 (70kHz) が木材内を伝わる速度は、劣化が進行し材の密度が低くなると遅くなることを利用して劣化度合いを診断する。本報告では、曲げ試験体で繊維平行方向 (L 方向)、全面圧縮試験体で繊維直交方向 (T 方向) の測定を行った。繊維平行方向の計測は、試験体の両端から 50mm の計測距離 900mm とした。

打ち込み深さ測定器は、長さ 40mm φ2.5mm の鋼製ニードルをバネの一定の反発力を用いて打ち込み、その深さを計測することで、表面付近の劣化度を診断する機器である。本報告における打ち込みは、劣化が辺材側から進行することおよび辺材側に集中することを考慮して、辺材側から放射方向 (R 方向) に実施した。また、曲げ試験体については劣化が激しいと思われる位置に打ち込むよう心がけた。

3 曲げ性能評価

3.1 曲げ試験概要

3.1.1 曲げ試験体概要 Table 1 に試験体リストを示す。蟻害試験体に関しては自然に生息しているシロアリによって食害を進行させているため、試験体数に差が

Table 1 List of bending test specimens.

Name	Species	Region	Deteriotate type	Number of specimens
SH	Sugi	heartwood	Termite attack	8
			Decay	17
			Control	4
SS		heartwood & sap wood	Termite attack	40
			Decay	47
			Control	16
TH	Todomatsu	heartwood	Termite attack	14
			Decay	10
			Control	14
TS		heartwood & sap wood	Termite attack	45
			Decay	10
			Control	19

生じている。なお、SHとSSのロットから取り出した無被害の試験体をスギコントロール (S-control) とし、同様にTHとTSの無被害の試験体をトドマツコントロール (T-control) とした。

3・1・2 曲げ試験方法 Fig. 5に曲げ試験の加力装置を示す。加力には2000kN 万能試験機の荷重レンジを20kN レンジに下げて用いた。試験体の支持は両端ともピン支持とした。载荷は支持スパン 900mm の3等分点4点载荷で実施した。変位計測にはストレインゲージ式変位計を用い、試験体の中央部のたわみは中央部の変位と支点のめり込み変位を元に算出した。

3・2 曲げ試験体の劣化性状

シロアリの食害は、スギに比べ、トドマツのほうが強い傾向がみられた。また、心材のみの試験体と辺材を含む試験体を比較すると、辺材を含む試験体のほうが食害を受けやすい傾向がみられた。

目視による確認では、食害が試験体の端部に集中しているものや中央部に集中しているもの、辺材側に集中しているものなど様々であることが確認された。ただし、概して食害が辺材側に集中する傾向は見られた (Fig. 6)。

腐朽については、培地等の条件が異なるために単純比較はできないが、トドマツに比べ、スギの劣化が強い傾向がみられた。辺材を含む試験体では、心材部より辺材部が劣化を受けていた。

目視による確認では、腐朽した箇所の繊維に沿って、繊維を長さ方向に分断するようにき裂が発生しているものが多くみられ、触診するとかなり柔らかくなっている状況であった。また、乾燥後は、目視で確認できる程、断面が減少しているものもみられた (Fig. 6)。

Fig. 5 Test set-up for bending test.

Fig. 6 Damaged specimen (left : termite attack, right : decay).

3・3 曲げ性能評価

3・3・1 破壊性状 曲げ試験による破壊の特徴は、蟻害試験体は樹種に関係なく食害の多い箇所からの曲げ破壊と、食害が繊維に沿って進むために激しい食害を受けた層から下部がはく離するような破壊がみられた (Fig. 7)。腐朽試験体でも腐朽度の激しい中央部、または加力点近傍からの曲げ破壊であった。

3・3・2 残存曲げ強度 Fig. 8～12に、曲げ強度と超音波伝播速度および打ち込み深さの関係を示す。すべての図に示されている Control 5% lower limit は、同じロットから採取した無被害のコントロール試験体の実験結果より求めた信頼水準 75% の 5% 下限値 (以下、5% 下限値) であり、併せて基準材料強度¹¹⁾も示した。なお、本報告の曲げ強度の算出に用いる断面は生物劣化を受ける前の断面 (50mm × 50mm) とした。これらの結果を踏まえて閾値についての考察も述べる。

Fig. 8とFig. 9に、すべての曲げ試験体から得られた曲げ強度と超音波伝播速度 (繊維方向) および打ち込み深さの関係を示す。両図より曲げ強度と両測定機器の測定値には、ばらつきはみられるものの正および負の相関があることがわかる。そこで、Fig. 10に蟻害試験体の曲げ強度と超音波伝播速度 (繊維方向) の関係を示す。Fig. 10よりシロアリ食害については、5000m/sを閾値

Fig. 7 Failure mode of bending test specimen (termite attack).

Fig. 8 Relationship between ultrasonic velocity and bending strength.

Fig. 9 Relationship between penetration depth and bending strength.

Fig. 10 Relationship between ultrasonic velocity and bending strength of specimens attacked by termite.

として残存耐力の低下を診断するできると考える。しかし、腐朽については超音波伝播速度との間にばらつきが大きく、閾値を決定することが困難であった。Fig. 11とFig. 12に生物劣化別の曲げ強度と打ち込み深さの関係を示す。両図とも打ち込み深さ15～25mm区間で5%下限値を下回るものが見られたため要注意とし、25mm以上では低い残存耐力を示すものが多数見られるため、この値を閾値として診断可能であると考え。しかし、打ち込み位置によって値が変わるため、部材内の劣化箇所の特定とその箇所における応力の関係より使用可能かの判断が必要となる。なお、閾値と考える値を図に黒の縦長点線、要注意と考える範囲を灰色で示した。

Fig. 11 Relationship between penetration depth and bending strength of decayed specimens.

Fig. 12 Relationship between penetration depth and bending strength of specimens attacked by termite.

Table 2 List of compression test specimens.

Name	Species	Region	Deteriotate type	Number of specimens	
				R	L
SS	Sugi	heartwood & sap wood	Termite	17	21
			Decay	47	13
			Control	20	17
TS	Todomatsu	heartwood & sap wood	Termite	10	10
			Decay	66	39
			Control	23	22

4 全面圧縮性能

4・1 全面圧縮試験概要

4・1・1 全面圧縮試験体概要 Table 2に試験体リストを示す。蟻害試験体は食害の進行が遅かったため、試験数が少なくなった。また、SH, THは試験数が少数であったため本報告ではSS, TSについてのみ報告する。

4・1・2 全面圧縮試験方法 Fig. 13に全面圧縮試験の加力装置と加力方向を示す。加力には1000kN 万能試験機の荷重レンジを20kN レンジに下げて用いた。加力部には球座を用いた。また、変位はストレーンゲージ式変位計を用い、試験体と球座の間に治具を設置し、その両端で変位を測定し、その平均値を圧縮変位とした。加力速度はJIS-Z2101（木材の圧縮試験）を参考に、L方向が24.50kN/min 以下、R方向が1.225kN/min 以下とした。

Fig. 13 Test set-up for compression test and load direction.

Fig. 14 Damaged specimen (left : termite attack, right : decay).

4・2 全面圧縮試験体の劣化性状

蟻害試験体および腐朽試験体 (Fig. 14) とともに, 試験体ごとの劣化度に差がみられた。蟻害試験体については, スギよりもトマツの食害が早い傾向がみられ, 心材のみの試験体よりも辺材を含む試験体の食害が早い傾向が確認できた。腐朽試験体については, 培地条件などが異なるが辺材を含む試験体の進行が早く, スギ試験体の腐朽の進行が早い傾向が見られた。

4・3 全面圧縮性能評価

4・3・1 破壊性状 Fig. 15 に蟻害試験体の R 方向加力, 腐朽試験体の L 方向加力の破壊性状を示す。劣化の要因にかかわらず, R 方向は早材部の圧壊, L 方向は繊維座屈と層のはく離がみられた。腐朽試験体に比べて蟻害試験体は, 蟻害の程度にもよるが, 辺材側の破壊が激しかった。これは, 辺材側に食害が集中したためと考えられる。腐朽試験体の破壊性状は, 劣化のないコントロール試験体とほとんど違いがみられなかった。

4・3・2 残存全面圧縮強度 L 方向加力では最大荷重まで荷重が上昇したのち急激に荷重が下がった。このため L 方向については最大荷重を用いて全面圧縮強度を求めた。R 方向加力では, まず荷重が上昇したのち, 変位が 1mm を超えたあたりから荷重の上昇が緩やかになり, その後はそのまま荷重が上昇し続けたため, 約 5mm 変位した時点で加力を終了した。このため R 方向については荷重-変位関係より初期剛性を目視により求め, その傾きを 1mm off-set した直線と荷重-変位曲線の交点の荷重より全面圧縮強度を求めた。なお, 圧縮強度算出に用いる断面は曲げ試験体と同様に劣化前の断面とした。

Fig. 16 ~ 19 に, 全面圧縮強度と超音波伝播速度および打ち込み深さの関係を示す。なお, すべての図に示されている Control 5% lower limit は曲げ試験と同様のコントロール試験体の実験結果より求めたものであり, 併せて基準材料強度¹²⁾も示した。また, 結果を踏まえて閾値についての考察も述べる。

全体的な傾向として曲げ試験の結果と類似しており, 全面圧縮強度と両測定機器の測定値には, ばらつきはあるものの相関がみられた。

Fig. 16 には, L 方向 (縦圧縮) 加力の蟻害試験体の全面圧縮強度と超音波伝播速度の関係およびコントロール試験体の結果を示す。試験体の数が少なく, 明確な閾値を得るのは困難であった。一方, 腐朽試験体ではほとんど関係を見いだせなかった。Fig. 17 と Fig. 18 に L 方向加力の蟻害試験体と腐朽試験体の全面圧縮強度と打ち

Fig. 15 Failure mode of compression test specimen (left : termite attack, right : decay).

Fig. 16 Relationship between ultrasonic velocity for T direction and compressive strength of L direction specimens attacked by termite.

Fig. 17 Relationship between penetration depth and compressive strength of L direction specimens attacked by termite.

Fig. 18 Relationship between penetration depth and compressive strength of L direction about decayed specimens.

Fig. 19 Relationship between penetration depth and compressive strength of R direction about decayed specimens.

込み深さの関係を示す。両図とも打ち込み深さが深くなるに従って強度が下がっており、曲げ試験の結果と同様、25mm 付近で基準材料強度に近くなり、このあたりを閾値とすることが妥当ではないかと考える。

つぎに、Fig. 19 に R 方向（横圧縮）加力の腐朽試験体の全面圧縮強度と打ち込み深さの関係を示す。この図においても L 方向と同様に 25mm 付近で残存耐力が基準材料強度を下回っており、25mm が閾値として妥当であると考え。ただし、20mm 付近ですでに圧縮強度が基準強度を下回っている試験体もみられるため、打ち込み深さが 20 ～ 25mm 区間は要注意と考える。しかし、超音波伝播速度については両試験体ともほとんど関係を見いだすことはできなかった。なお、Fig. 17 ～ 19 には曲げ試験結果と同様に閾値と思われる値を付記している。

5 結 言

生物劣化を受けた木材の曲げおよび全面圧縮残存耐力を評価することを目的として、シロアリに食害された蟻害試験体と褐色腐朽菌によって腐朽した腐朽試験体をそれぞれ調製し、実験的に検討した。その結果、今回の実験で用いたスギ・トドマツでは、曲げ強度に関して打ち込み深さ測定器では生物劣化の種類にかかわらず 25mm、超音波伝播速度測定器では繊維方向の計測で 5000m/s、圧縮強度に関して打ち込み深さ測定器では腐朽について縦圧縮・横圧縮ともに 25mm を閾値とすることが妥当であると考え。また、縦圧縮強度に関して超音波伝播速度計測器では T 方向に計測した場合、明確な閾値は判断できず、今回のような小試験体において圧縮強度の閾値を T 方向の超音波伝播速度を用いて設定することは、現状では難しいと考える。

残存耐力評価のさらなる精度向上のためには、両測定機器の測定値を複合的に評価したり、計測する箇所を増やすなどの工夫が必要であると考え。また、実際の使用状況を考慮すると、材の含水率が異なる場合についても評価できるようになることが望ましいと考える。

本研究は、科学研究費補助金・若手研究 A (21686053 研究代表者：森 拓郎) により実施しました。また、京都大学生存圏研究所吉村剛教授、農学研究科藤井義久准教授・藤原裕子博士にアドバイスをいただきました。実験において、京都大学生存圏研究所小松研究室および大分大学工学部井上研究室の学生諸氏に実験の補助を受けました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) S. Nukumizu, K. Kawano, Y. Noguchi, T. Mori, Y. Yanase, K. Tanaka, M. Mori, Y. Noda, H. Kurisaki, T. Yoshimura, K. Komatsu and M. Inoue, "Study on surviving strength properties of japanese softwood with biodeterioration", Collection of Architectural Institute of Japan Kyushu Chapter Architectural Research Meeting (Structure), No.51, pp.629-632 (2012).
- 2) The Japanese Building Disaster Prevention Association, "Seismic diagnosis and reinforcement method for residential wooden house", pp.125-126, pp.312-330 (2006).
- 3) Japan Wood Preserving Association, "Diagnosis manual of the fungi and the pest damage of residential house for strategist", pp.98-110 (2004).
- 4) Japan Housing and Wood Technology Center, "The durability design and control of maintenance and deterioration diagnosis for residential wooden house", pp.105-129 (2002).
- 5) H. Sakai, Y. Iwamoto, Y. Nakamura and T. Kobayashi, "Decay resistance of wood stakes impregnated with preservatives containing copper (I) relationship between impregnation and service life", Wood Preservation, Vol.36-1, pp.17-22 (2010).
- 6) T. Goto, Y. Tomikawa, S. Nakayama and T. Furuno, "Changes of propagation velocity of ultrasonic waves and partial compression strength of decay-treated relationship between decrease of propagation velocity of ultrasonic waves and remaining strength", Mokuzaigakkaishi, Vol.57, No.6, pp.359-369 (2011).
- 7) M. Noguchi, T. Yoshimura and K. Miyazawa, "The compressive strength of the terminated timber", Journal of Structural Engineering, Vol.54B, pp.171-176 (2008).
- 8) W. Ohmura, K. Yamamoto, H. Ido, H. Nagao, H. Kato, K. Momohara, H. Matsunaga, A. Miyatake and Y. Kodate, "Change in durability of glued laminated timber under accelerated decay conditions and compression strength perpendicular to the grain after decay", Wood Industry, Vol.61, No.10, pp.446-451 (2006).
- 9) T. Mori, A. Kousoku, Y. Yanase and K. Komatsu, "Relationships between strength properties and density or ultrasonic velocity of timber attacked by termite", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.59, No.4, pp.297-302 (2010).
- 10) Y. Namase, M. Hata, M. Goto and Y. Suzuki, "Study on proof stress decline by the long-term durability of the traditional wooden framework - compressive strength of the material and deterioration diagnosis method-", Collection of Architectural Institute of Japan Hokuriku affiliate research report, pp.101-104 (2005).
- 11) Architectural Institute of Japan, "Standard for structural design of timber structures", p.339 (2002).
- 12) Architectural Institute of Japan, "Standard for structural design of timber structures", pp.339-340 (2002).