アメリカカンザイシロアリ食害材の空隙率と残存曲げ強度の関係[†]

築瀬 佳之* 森 拓郎** 吉村 剛** 藤原 裕子***
藤井 義久* 鳥越 俊行**** 今津 節生****

Relationship Between Porosity in Wood Attacked by the Drywood Termite *Incisitermes Minor* and Residual Bending Strength

by

Yoshiyuki YANASE*, Takuro MORI**, Tsuyoshi YOSHIMURA**, Yuko FUJIWARA***,
Yoshihisa FUJII*, Toshiyuki TORIGOE**** and Setsuo IMAZU****

The feasibility of porosity calculate by using X-ray computed tomography (X-ray CT) to evaluate the relationship between the cavities in wood attacked by drywood termite of *Incisitermes minor* and residual bending strength was investigated. Fifty three wood specimens of Japanese cedar Sugi (*Cryptomeria japonica*) with 1200mm-length attacked by *I. minor* were prepared for the measurements of density, dynamic longitudinal elastic modulus, ultrasonic velocity, porosity by using X-ray CT, and bending strength. It was related to high positive correlation between density or dynamic longitudinal elastic modulus, and bending strength. It was seemed that the higher negative correlation between the porosity of center part of 360mm of specimen and bending strength, than the porosity of specimen with 1200mm-length. It was possible to select the specimens more than the standard strength of Sugi with the highest accuracy in the relationship between the dynamic longitudinal elastic modulus and the bending strength, by using the ratio of section modulus calculated from the maximum porosity in center parts divided into six in the longitudinal direction as sifting all the cavities in the radial direction.

Key words:

Drywood termite, Termite attack, Residual bending strength, X-ray computed tomography, Porosity, Dynamic longitudinal elastic modulus

1 緒 言

近年、北米産の木材や家具の輸入などによるアメリカカンザイシロアリ (*Incisitermes minor*) の日本への定着とともに、その被害が年々広がっているという現状がある¹⁾。アメリカカンザイシロアリは1軒の住宅において多数の小さなコロニーに分散して生息し、乾燥材を食害するので、日本において経済的に重要なイエシロアリ (*Coptotermes formosanus*) やヤマトシロアリ (*Reticulitermes speratus*) のように主たる被害が床下や水廻りに限定されない。また、木材表面などに、糞や土を固めて作った蟻道を形成することもほとんどない。したがって、食害活動や食害部位の探知、駆除技術の確立、さらには食害程度を評価し、残存強度を適切に把握することが非常に困難である。アメリカカンザイシロアリの被害の探知方法としては、目視によって砂粒状の虫糞を手掛かりにする方法が一般的であるが、近年、住宅部材を破壊することなく、アメリカカンザイシロアリの活動を探知する手法であるアコースティック・エミッション (AE)²⁾およびマイクロ波探知機 (TermatracTM)^{3), 4)}を用

いた非破壊的な探知技術が開発され、食害活動や食害部位の探知に利用されている。また、防除技術に関しても、各種木材保存剤のアメリカカンザイシロアリに対する防蟻性能の評価試験^{5), 6)}や、電磁波を用いた駆除方法に関する研究⁷⁾も行われている。

一方、アメリカカンザイシロアリの食害様式は、地下シロアリのイエシロアリやヤマトシロアリとは異なるため、食害材の残存耐力に及ぼす影響も異なると考えられる。シロアリ食害材の残存強度評価については、これまで、イエシロアリ食害材中での超音波伝搬速度の低下と残存強度の低下にある程度の相関がみられることが報告されている^{8), 9)}。また、イエシロアリ食害材の断面欠損率と強度低下の関係¹⁰⁾についても報告されているが、特にアメリカカンザイシロアリ食害による木材内部の空隙の形状は複雑で、部位によっては断面欠損率が大きく異なるため、より直接的に空隙部分を評価し、残存強度との関係について検討する必要がある。

食害材内部の空隙部分を評価する手法の一つに、X線コンピュータ断層撮影 (X線 CT) を用いることが考えら

[†] 原稿受理 平成25年8月12日 Received Aug. 12, 2013 ©2014 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 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.

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

*** 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.

**** 九州国立博物館 〒818-0118 太宰府市石坂
Kyushu National Museum, Ishizaka, Dazaifu, 818-0118.

れ、実際に、アメリカカンザイシロアリと同じ乾材シロアリである *Cryptotermes secundus* の食害材内部の観察に利用された研究例¹¹⁾はあるが、食害による空隙部分の体積と残存強度の関係についての報告はない。

本研究では、アメリカカンザイシロアリの食害による木質部材や建築物の強度性能への影響について検討するために、X線CT装置を用いて食害材を撮像し、食害によってできた空隙の体積の測定を試みた。そして、撮像に供した食害材について曲げ試験を行い、食害材の空隙率と曲げ強度の関係について検討した。

2 実験方法

2・1 供試材料

和歌山県内において、アメリカカンザイシロアリ (*Incisitermes minor*) による被害建物を解体し、解体後の胴縁材、母屋材から、木口断面約 50×50mm、長さ 1200mm のスギ (*Cryptomeria japonica*) 試験体を 53 体作製した。試験体の寸法と質量から容積密度、ハンマ打撃を用いた縦振動法による固有振動数から動的な縦弾性係数を測定した¹²⁾。また、超音波伝搬速度測定器 (AKITA SKK 社製 Dr. Wood) を用いて、繊維方向 (長さ 1200mm) の超音波伝搬速度を測定した (Fig. 1)。超音波伝搬速度測定器は、丸太材や角材などの測定部に送信および受信探触子を押当てることによって、超音波 (周波数 70kHz) の伝搬時間を測定する。シロアリ食害による木材内部の空隙の増加に伴い、伝搬時間が増加し、結果として、伝搬速度が低下する。なお、含水率計 (ケット科学研究所製, HM-520) を用いて試験体表面で計測した試験時の含水率は、約 10% であり、ばらつきはほとんどなかった。

Fig. 1 Measurement of ultrasonic velocity using Dr. Wood.

2・2 X線CT撮像

本研究では、食害材の空隙体積を測定するために、大型 X 線 CT 装置 (エクスロン・インターナショナル社製, Y.CT Modular320 FPD) を用いて、試験体をまとめて断層撮像を行った (Fig. 2)。撮像条件は、管電圧 160kV、管電流 1.5mA、分解能 0.3mm とした。各試験体の CT 画像データは、CT 画像解析ソフトウェア (Volume Graphics 社製, VGStudio MAX 2.0) を用いて 3 次元化し、食害材の木材実質から、空隙部分の抽出を試み、空隙体積の測定を行った (Fig. 2)。

それぞれの試験体について、食害による空隙体積から、以下の 4 種類 ((a)~(d)) の空隙率を算出した (Fig. 3)。
空隙率(%) = 食害材の空隙体積 / 食害材全体の体積 × 100
(a) 試験体全体 (1200mm) の空隙率

- (b) 曲げモーメント一定区間 (中央部分 360mm) の空隙率
(c) 材せい方向に中央部分 360mm を 5 分割した空隙率
(d) 長さ方向に中央部分 360mm を 6 分割した空隙率
なお、(d) については、6 分割して求めた空隙率のうち、最大値を用いることとした。

Fig. 2 X-ray computed tomograph (X-ray CT, left) and 3-D image of sixteen specimens (right).

Fig. 3 Four kinds of porosity ((a) to (d)) calculated from the cavity volumes.

2・3 曲げ試験

断層撮像後、試験体は曲げ試験に供した。試験は、Instron 製材料試験機を用いて、スパン 1080mm の 3 等分 4 点曲げで行った (Fig. 4)。本研究では、実際の建築物でアメリカカンザイシロアリの被害が最も多い小屋裏を想定した場合、梁や桁に心持ち材が使用されることが多く、必ず木表が引張り側になるため、木裏側から荷重を加えた。試験時の測定項目は、荷重と中央たわみおよび支点のめり込み変位であり、曲げ破壊試験により、曲げ強度を導出した。なお、断面係数は、断面形状が長方形で、内部は一様であるとし、試料の外形寸法を用いて算定した。

Fig. 4 Test set-up for bending test.

3 結果と考察

3・1 食害材の空隙率と曲げ強度の関係

53 体の試験体について、3 次元画像より測定した試験体 1200mm の空隙率はほとんどが 30% 以下であり、食害が最も激しい試験体で 45% 程度であった。

本試験において, Fig. 5 のように, 縦振動法によって求めた動的な縦弾性係数は, 曲げ強度と高い正の相関がみられた. また, Fig. 6 のように, 容積密度も曲げ強度と高い正の相関がみられた. 木材の生物劣化の診断に用いられる超音波伝搬速度は, 健全材では繊維方向で約 5000m/s であるが, 生物劣化による木材の密度低下や空洞化によって, 伝搬速度が低下する^{8),9)}. Fig. 7 のように, 超音波伝搬速度は, 曲げ強度と正の相関はみられるものの, ばらつきが大きく, 食害による部分的な空隙の影響により, 測定箇所によっては繊維方向に空隙がなければ, 健全材と同様の速度で伝搬することも推察された. また, 空隙の存在により試験体の見かけの密度が低下することによって, 曲げ強度は低下するものの, 超音波の伝搬には影響しないこともあると推測された.

Fig. 5 Relationship between bending strength and dynamic longitudinal elastic modulus.

Fig. 6 Relationship between bending strength and density.

Fig. 7 Relationship between bending strength and ultrasonic velocity.

Fig. 8 のように, 試験体全体 (1200mm) の空隙率 (Fig. 3(a)) と曲げ強度の関係は, 負の相関は見られるもののば

らつきが大きくなった. これは, 空隙率 0% に近い試験体 (アメリカカンザイシロアリ食害がほとんどみられない健全材) 間でも, 曲げ強度が異なる傾向があり, スギ試験体間での強度のばらつきが影響していると考えられる. 本試験において, 支点部に激しい食害が存在する場合, 曲げ試験に供することが不可能であるため, 試験体作製時に除外した. したがって, ほとんどの試験体は中央部で破壊に至った. また, 十分なスパンで試験を実施したため, せん断による破壊も観察されなかった. さらに, 試験体における部分的な空隙の位置も影響していると考え, より強度に影響を及ぼすと考えられる曲げモーメント一定区間 (中央部分 360mm) について, 詳細な空隙率を評価することとした.

Fig. 8 Relationship between bending strength and porosity of specimen with 1200mm length, refer to Fig. 3(a).

Fig. 9~11 は, それぞれ曲げモーメント一定区間 (中央部分 360mm) (Fig. 3(b)), 材せい方向に 5 分割 (Fig. 3(c)), 長さ方向に 6 分割 (Fig. 3(d)) のときの空隙率と曲げ強度の関係を示す. 中央部分の空隙率は, 曲げ強度と負の相関がみられ, さらに, 試験体全体の場合よりも, ばらつきが少なくなる傾向がみられたことから, 中央部分の空隙率を使うことによって, より高い精度で曲げ強度との関係を評価できると考えられる. 材せい方向の空隙率については, 加力面と底面付近では, 大きな応力が発生し, また材表面付近の食害が激しいため, 空隙率 (Fig. 10 のプロット●と○) と曲げ強度の関係は負の相関が見られたが, それ以外は空隙率が低かったため, 強度との相関は認められなかった. また長さ方向に 6 分割した各部分での空隙率の最大値と曲げ強度の関係は, 中央部分

Fig. 9 Relationship between bending strength and porosity of center part (360mm) of specimen, refer to Fig. 3(b).

360mm の空隙率と同様の傾向が見られ、試験体全体の場合よりも、ばらつきが少なくなる傾向がみられた。

Fig. 10 Relationship between bending strength and porosities of center part divided into five in the radial direction, refer to Fig. 3(c).

Fig. 11 Relationship between bending strength and maximum porosity in center parts divided into six in the longitudinal direction, refer to Fig. 3(d).

3・2 空隙率を考慮した断面係数の比と動的な縦弾性係数-曲げ強度の関係

ハンマ打撃を用いた縦振動法によって求めた動的な縦弾性係数は、曲げ強度と高い正の相関がみられたことから (Fig. 5), 例えば、スギの基準強度を上回る試験体を選別することは可能であるが、その場合、食害を受けて空隙率が高い試験体も含まれる可能性がある。そこで、動的な縦弾性係数-曲げ強度の関係について、さらに空隙率を考慮して評価することによって、スギの基準強度を上回り、かつ食害による空隙が少ない試験体の選別を試みた。全断面が健全である時の断面係数(Z)に対する、空隙率を考慮した時の断面係数($Z_1 \sim Z_3$)の比を、Fig. 3 で求めた空隙率を用いて、Fig. 12 のように求めた。

(1) すべての空隙が幅方向に揃っていると仮定した時の断面係数(Z_1)の比 (幅) (Fig. 3(a), (b), (d))

$$\frac{Z_1}{Z} = \frac{b-b'}{b} \quad (1)$$

ここで、 b : 試験体全体の幅(mm)

b' : 幅方向に揃えた時の空隙の幅(mm)

(2) すべての空隙が材せい方向に揃っていると仮定した時の断面係数(Z_2)の比 (せい) (Fig. 3(a), (b), (d))

$$\frac{Z_2}{Z} = \frac{(h-h')^2}{h^2} \quad (2)$$

ここで、 h : 試験体全体のせい(mm)

h' : 材せい方向に揃えた時の空隙のせい(mm)

(3) Fig. 3(c)の空隙率を用いて、材せい方向に5分割した各層におけるすべての空隙が幅方向に揃っていると仮定し等価断面として計算した時の断面係数(Z_3)の比 (幅5層) (Fig. 3(c))

$$\frac{Z_3}{Z} = \frac{(b-b_1'') + 3(b-b_2'') + 5(b-b_3'') + 7(b-b_4'') + 9(b-b_5'')}{50b} \quad (3)$$

ここで、 $b_1'' \sim b_5''$: 材せい方向に5分割した各層について、幅方向に揃えた時の空隙の幅(mm)

なお、Fig. 3(d)の空隙率については、長さ方向に6分割したうちの最大値を用いた。

各空隙率を用いた断面係数の比を考慮した動的な縦弾性係数と曲げ強度の関係を Fig. 13~19 に示す。なお、断面係数の比が0.9以上のものを◆、0.75~0.9のものを●、0.75以下のものを■とし、各図中に、スギの基準強度22.2N/mm²を示した¹³⁾。

Fig. 12 Calculation of ratio of section modulus from four porosities, refer to Fig. 3.

動的な縦弾性係数と断面係数の比から曲げ強度を推定し、スギの基準強度を考慮して、食害材の選別を行うとすると、試験体全体から求めた断面係数の比(a)-(1)と(a)-(2)は、断面係数の比が0.9以下の試験体を排除した場合、基準強度を上回る試験体もほとんど排除されることから、選別の精度は低いと考えられる。したがって、試験体全体から断面係数の比を求めることは、空隙率と曲げ強度の関係 (Fig. 8) からあまり適切ではないと考えられる。また、(b)-(1)については、断面係数の比が0.9以上の試験体を選別した場合、基準強度を下回る試験体が多く、誤った選別をすることになるため、その精度は低いと考えられる。一方、(b)-(2)、(c)-(3)、(d)-(1)については、断面係数の比が0.9以上の試験体を選別した場合、基準強度を下回る試験体は少なく、選別する精度は高くなる傾向が見られた。さらに、より安全側で評価するのであれば、(d)-(2)において、断面係数の比が0.9以上の試験体を選別した場合、基準強度を下回る試験体は1つであり、最も精度よく試験体を選別可能であることがわかった。したがって、応力が大きい試験体中央部分の空

隙率を用いて断面係数の比を算出し、ハンマ打撃を用いた縦振動法による動的な縦弾性係数の計測と組み合わせることによって、高い精度で、基準強度を満たさない食害材を排除できる可能性が示唆された。

Fig. 13 Relationship between bending strength and dynamic longitudinal elastic modulus using ratio of section modulus of (a)-(1), refer to Fig 3(a) and Fig 12(1).

Fig. 14 Relationship between bending strength and dynamic longitudinal elastic modulus using ratio of section modulus of (a)-(2), refer to Fig 3(a) and Fig 12(2).

Fig. 15 Relationship between bending strength and dynamic longitudinal elastic modulus using ratio of section modulus of (b)-(1), refer to Fig 3(b) and Fig 12(1).

Fig. 16 Relationship between bending strength and dynamic longitudinal elastic modulus using ratio of section modulus of (b)-(2), refer to Fig 3(b) and Fig 12(2).

Fig. 17 Relationship between bending strength and dynamic longitudinal elastic modulus using ratio of section modulus of (c)-(3), refer to Fig 3(c) and Fig 12(3).

Fig. 18 Relationship between bending strength and dynamic longitudinal elastic modulus using ratio of section modulus of (d)-(1), refer to Fig 3(d) and Fig 12(1).

Fig. 19 Relationship between bending strength and dynamic longitudinal elastic modulus using ratio of section modulus of (d)-(2), refer to Fig 3(d) and Fig 12(2).

4 結 言

本研究は、アメリカカンザイシロアリの食害による木材内部の空隙の強度性能への影響を明らかにすることを目的とし、X線CTを用いて食害材を撮像し、測定した空隙体積から食害材の空隙率を求め、空隙率と曲げ強度の関係について検討した。さらに、空隙率から求めた断面係数の比を考慮した動的な縦弾性係数と曲げ強度の関係についても検討した。

その結果、以下のような結論を得た。

- 1) 空隙率と曲げ強度には、ばらつきが大きいものの負の相関関係がみられた、
- 2) 試験体全体の空隙率よりも曲げモーメント一定区間（中央部分 360mm）の空隙率を用いることによって、ばらつきが小さくなり、曲げ強度とより良好な関係がみられた。
- 3) 動的な縦弾性係数-曲げ強度において、7種類の断面係数の比のうち、中央部分 360mmを長さ方向に6分割した空隙率の最大値を、材せい方向に考慮した断面係数の比を用いて評価することによって、最も精度よくスギの基準強度を上回る試験体を選別することが可能であった。

以上の結果より、応力が大きい部分を重点的に調べることによって、必要性能を満たしているのかを判断できることが示唆された。

本研究の一部は、林野庁補助事業「住宅分野への地域材供給シェア拡大総合対策事業」および（財）住宅総合研究財団 2010 年度研究助成（代表者：築瀬佳之）による補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Y. Yanase, T. Mori, Y. Fujiwara and M. Minami, "Investigation of damage by drywood termite in Japanese wooden structures", Journal of the Housing Research Foundation "JUSOKEN", No.38, pp.245-256 (2012)

- 2) Y. Yanase, Y. Fujii, S. Okumura, Y. Yoshimura and Y. Imamura, "Detection of termite attack of *Incisitermes minor* (Hagen) using AE monitoring", Japanese Journal of Environmental Entomology and Zoology, Vol.12, No.2, pp.53-67 (2001).
- 3) T. A. Evans, "Assessing efficacy of Termatrac™; A new microwave based technology for non-destructive detection of termites (Isoptera)", Sociobiology, Vol.40, No.3, pp.575-583 (2002).
- 4) Y. Indrayani, T. Yoshimura and Y. Imamura, "Detection of the activities of the western dry-wood termite, *Incisitermes minor* (Hagen), in small infested logs by using a microwave detector", Japanese Journal of Environmental Entomology and Zoology, Vol.17, No.1, pp.29-32 (2006).
- 5) W. Ohmura, I. Momohara and A. Makita, "Evaluation of wood preservatives against the drywood termite, *Incisitermes minor* (Hagen)", Mokuzai Hozon (Wood Preservation), Vol.36, No.6, pp.248-253 (2010).
- 6) W. Ohmura, I. Momohara and A. Makita, "Evaluation of wood preservatives against the drywood termite, *Incisitermes minor* (Hagen) (II): Performance of impregnated woods after weathering", Mokuzai Hozon (Wood Preservation), Vol.37, No.6, pp.273-278 (2011).
- 7) K. Nakai, T. Mitani, T. Yoshimura, N. Shinohara, K. Tsunoda, and Y. Imamura, "Effects of microwave irradiation on the drywood Termite *Incisitermes minor* (Hagen)", Japanese Journal of Environmental Entomology and Zoology, Vol.20, No.4, pp.179-184 (2009).
- 8) T. Mori, A. Kousoku, Y. Yanase, 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).
- 9) T. Mori, Y. Yanase, K. Tanaka, K. Kawano, Y. Noda, M. Mori, H. Kurisaki and K. Komatsu, "Evaluation of compression and bending strength properties of wood damaged from bio-deterioration", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.62, No.4, pp.280-285 (2013).
- 10) M. Noguchi, T. Yoshimura and K. Miyazawa, "The compressive strength of the terminated timber", Journal of Structural Engineering, Vol.54B, pp.171-176 (2008).
- 11) A. Fuchs, A. Schreyer, S. Feuerbach and J. Korb, "A new technique for termite monitoring using computer tomography and endoscopy", International Journal of Pest Management, Vol.50, No.1, pp.63-66 (2004).
- 12) N. Sobue, "Measurement of young's modulus by the transient longitudinal vibration of wooden beams using a fast fourier transformation spectrum analyzer", Mokuzai Gakkaishi, Vol.32, No.9, pp.744-747 (1986)
- 13) Architectural Institute of Japan, "Standard for structural design of timber structures", pp.399(2006) Architectural Institute of Japan.