腐朽したスギ材に打込まれた釘の一面せん断耐力の推定[†]

森 拓郎* 田中 圭** 河野孝太郎**
中畑拓巳** 築瀬佳之*** 栗崎 宏****

Estimation of Shear Strength of Nail Driven into Decayed Wood of Japanese Cedar Sugi

by

Takuro MORI*, Kei TANAKA**, Kotaro KAWANO**,
Takumi NAKAHATA**, Yoshiyuki YANASE*** and Hiroshi KURISAKI****

This study was aimed at evaluating and estimating the shear strength properties of nailed wood (Sugi) connection damaged by decay. Steel and stainless steel nails were driven into specimens, and then the specimens were decayed by compulsion using cultured brown rot fungi (*Fomitopsis palustris*). The Pilodyn's penetration depth and the bearing strength were measured to estimate the shear strength of nailed connection damaged by decay. The single shear tests of nailed connection were conducted to investigate relationship between Pilodyn's penetration depth and shear strength. It was found that the stainless steel nails slightly decreased yield strength with increasing penetration depth. However, the steel nails showed an opposite tendency due to rust. The deeper the penetration depth caused the lower the bearing strength. The shear strength of decayed nailed joint was also compared with the estimated strength by the European Yield Theory (EYT) based on the bearing strength calculated from the penetration depth, and as results of both data showed good agreement. Thus, it was proposed 29 mm of Pilodyn's penetration depth as the threshold value for nailed connection using Sugi.

Key words:

Bio-deterioration, Bearing strength, Shear strength, Brown rot fungi, Pin penetration depth

1 結 言

木材が生物劣化を受けると残存している耐力は低下するが、木造住宅などの構造物において実際にどれほど耐力や耐震性が低下するのかわかっていない。そのため、木造建築の耐震性能を評価するために用いられている標準的な資料^{1)~3)}にも明確な記載は見られない。そこで、筆者らは、部材レベルでの検討を重ね、その結果として超音波伝播速度やピロディン®の打ち込み深さによって、部材レベルでの耐力推定、また使用限度に関する閾値を決定できる可能性を示唆した^{4),5)}。もちろん、木質構造物は部材レベルの劣化によって耐力が減少し、その機能が大きく損なわれるが、最も耐力に大きな影響を与える箇所は接合部である。そのため、接合部に焦点を当て木材の生物劣化を踏まえた接合耐力の検討^{6),7)}や釘など接合具単体⁸⁾の検討などの研究がある。また、釘自体の劣化から耐用年数について検討⁹⁾した研究などが行われてきている。特に釘は、古くから用いられている接合具であるため、その引き抜き耐力をもとに部材の性能を評価しようとする試み^{10),11)}などもみられ、釘自体については、様々な検討が行われてきている。これらの中で、阿部の涙菌

による腐朽と針葉樹材の強度¹²⁾、高橋らの腐朽菌の種類と強度劣化¹³⁾、十代田の腐朽を受けた各種木材の圧縮強度と釘の引き抜き耐力¹⁰⁾、いずれにも、樹種が異なることによって生物劣化による耐力の低下や接合具の強度性能の変化に差異があることが報告されている。

そこで本研究では、腐朽したスギ材に打ち込まれた釘の一面せん断性能を推定することを目的として、腐朽したスギ材に打ち込まれた釘の一面せん断性能試験、腐朽した材を用いた支圧試験、これらを非破壊に推定するためのピロディン®を用いた打ち込み深さ計測などを行い、その関係を明らかにしたので報告する。さらに、これらの関係から検討した耐力推定方法について提案する。

2 試験概要

2.1 劣化診断機器および測定項目

本研究で劣化度を評価するために用いた診断機器は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、以下：診断機器）である。診断機器は、長さ40mmφ2.5mm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

† 原稿受理 平成 25年 8月 7日 Received Aug. 7, 2013

©2014 The Society of Materials Science, Japan

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

** 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.

*** 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.

**** 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. for Toyama Prefectural Agricultural, Forestry and Fisheries Res. Center, Kurokawashin, Imizu, 939-0311

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深さの計測は、支圧試験体においては辺材側から、一面せん断試験体においては辺材および心材側から放射方向（R 方向）に釘打ち込み位置近傍で、一度ずつ実施した。また、支圧試験体は試験後、乾燥器にて 105℃、二日間で絶乾状態とした後、小片の重さを計測し、腐朽後の容積密度および含水率を求めた。

Fig.1 Pilodyn®.

2.2 腐朽操作および試験体概要

Fig.2 に試験体調整の様子を示す。試験体には気乾密度 365kg/m³、変動係数 0.03 のスギ (*Cryptomeria japonica*) 材を用いた。腐朽操作は、富山県農林水産総合技術センター木材研究所において実施した。腐朽操作には、腐朽速度が速く針葉樹において加害が激しいオオウズラタケ (*Fomitopsis palustris*) を用いた。まず、腐朽菌を培養したバーミキュライトの培地を 50×50×250mm の試験体中央部に接種し、約 4 週から 18 週の間、強制腐朽させた。強制腐朽させた後、気乾状態まで乾燥させ、釘の一面せん断試験に供し、試験終了後の試験体より、中央部の腐朽箇所から 1 体（腐朽試験体）、端部の健全と思われる部分から 1 体（コントロール試験体）の支圧試験体を採用した。

Fig.2 Decaying single shear joint specimen by brown rot fungi (Bearing test was carried out following shear test).

3 支圧性能

3.1 支圧試験概要

3.1.1 支圧試験 Fig.3 に試験体形状および寸法を示す。支圧試験の加力用のピンは、普通鉄丸くぎ N50 釘の釘頭を削り、長さ 45.43mm、径 2.75mm とした。腐朽期間は約 4 週から 18 週とし、コントロール試験体と腐朽試験体を各 39 体用意した。試験時の含水率は概ね 12%であった。

Fig.3 Dimension of specimen. (Unit in mm)

3.1.2 支圧試験方法 Fig.4 に支圧試験の加力装置を示す。支圧試験は試験体に溝を設けず、釘を Fig.4 に示すように釘側面から押し込むように行い、加力方向は繊維平行方向とした。载荷は 100kN 万能試験機（インストロン社製）による単調载荷（载荷速度：1.4mm/min）で行った。変位はクロスヘッドの移動と同じであり、クロスヘッド変位を 2 本のストレインゲージ式変位計にて計測した。

Fig.4 Set-up for bearing test.

3.2 支圧性能評価

3.2.1 診断機器による測定値と密度の関係 Fig.5 に支圧試験体における診断機器の打ち込み深さと容積密度の関係を示す。多少のばらつきはあるものの打ち込み深さと密度には負の相関がみられた。このことから、打ち込み深さの測定により密度低下の度合について診断することが可能であると考えられる。

Fig.5 Relationship between penetration depth and density.

3.2.2 荷重変位関係 Fig.6 に支圧試験における荷重変位関係を示す。腐朽試験体とコントロール試験体では、腐朽試験体の方が比較的剛性が低くなる傾向がみられた。これは、腐朽によって木材の支圧剛性が低下したためと考えられる。

Fig.6 Relationship between load and displacement.

3.2.3 支圧強度と容積密度および診断機器による測定値の関係 Fig.7 に支圧試験における支圧強度と容積密度の関係を示す. なお, ここでは, 約 2.7mm 変形時で加力盤が試験体に触れることによって始まる急激な荷重上昇を起こす前までの最大の値を最大荷重とした. そして, その最大荷重を支圧面積である釘の見付面積で除したものを支圧強度とした. 図より, コントロール試験体, 腐朽試験体ともに密度が低下するに従い支圧強度が低下する傾向がみられた. また腐朽試験体において, 同程度の密度でも支圧強度に大きな差のある試験体が多数存在した.

Fig.7 Relationship between density and bearing strength.

Fig.8 に支圧強度と打ち込み深さの関係を示す. コントロールと腐朽試験体の値を区別せずに求めた累乗近似曲線とスギの基準支圧強度¹⁴⁾も併せて示す. 打ち込み深さが深くなるに従い, 支圧強度が低くなる傾向がみられた. また, 支圧強度を大きく下回るのは打ち込み深さ 30mm を超えたあたりであることがわかった. また, 回帰曲線を信頼水準 75% の 5% 下限値に相当するようにノンパラメトリック法で検討した結果, 0.73 という低減係数が得られた. この低減した曲線と基準支圧強度の交点は約 29.3mm であり, 現行の基準支圧強度を満たす打ち込み深さのしきい値として 29mm を提案する. また, 同図中に戸田⁸⁾ がトドマツ (*Abies sachalinensis*) を用いて提案している支圧強度の推定曲線も併せて示す. 腐朽の程度の違いも考えられるが, 戸田らが提案した推定曲線は, 本研究の実験値と比較して低い値を示し, 樹種による違いが大きいことが確認された.

Fig.8 Relationship between penetration depth and bearing strength.
Note: — average curve, - - - proposal curve, ... Toda⁹⁾,

4 一面せん断性能

4.1 一面せん断試験概要

4.1.1 一面せん断試験体 Fig.9 に試験体形状, 寸法および釘打ち込み位置を示す. 一面せん断試験の接合具には長さ 45mm の鉄釘 (普通鉄丸くぎ N45, 径 2.45mm) とステンレス釘 (径 2.3mm) を, 1 体の試験体に対して心材側と辺材側から各 1 本ずつ, 釘頭の下を 3mm 残すように打ち込んだ. 腐朽期間は 4 週, 6 週, 10 週, 14 週, 18 週とし, 各 4 体とした. 都合, 試験体 1 体につき 4 つのデータが得られることとなる.

4.1.2 一面せん断試験方法 Fig.10 に一面せん断試験の加力装置を示す. 2000kN 万能試験機 (島津製作所製) を用いて試験体を固定し, 図の治具を引張ることによって引張型による単調載加 (載荷速度: 1.0mm/min) の一面せん断試験を行った. 荷重の計測には 2kN のロードセルを用いた.

Fig.9 Dimension of specimens and locations of nails. (Unit in mm)

Fig.10 Set-up for single shear nailed connection test.

Fig.11 State of decay (wet condition).

4.2 一面せん断試験体の劣化性状

Fig.11 に一面せん断試験体の劣化性状を示す. 4 週から 18 週の腐朽期間の違いは, 目視では側部や表裏部の痩せ, また触診において表面部の軟化度合いの違いなどがみられた. 強制腐朽後, 気乾状態まで乾燥させることで, 腐朽部分に褐色腐朽菌による被害特有の繊維を分断するき裂が多く発生した. また, 鉄釘では錆が多くみられたが, ステンレス釘では錆がほとんど確認されなかった.

4.3 一面せん断性能評価

4.3.1 破壊性状 Fig.12 に破壊性状を示す. 鉄釘では試験の最終段階において釘頭が破断するものがほとんどであり, ステンレス釘では釘の曲げ変形がすべての試験体で見られた. 破壊性状については, 釘の種類による違いはみられたものの, 打ち込み面の辺心材による違い, 腐朽の有無による差異はみられなかった.

Fig.12 Failure mode of shear test (Left: SS, Right: SUS).

4.3.2 荷重変位関係 Fig.13 と Fig.14 に一面せん断試験の荷重変位関係の一例を示す. 鉄釘の腐朽試験体においては釘頭の破断により終局破壊に至るため, 終局破壊時の変位がコントロール試験体に比べて小さくなる傾向がみられた. これは鉄釘が錆びたためによる断面の減少によると考えられる. また, 過去の報告^{9),15)}と同様の錆によると考えられる耐力の上昇が鉄釘試験体においてみられた. しかし, ステンレス釘ではそのような傾向はみられず, コントロール試験体と腐朽試験体の挙動に大きな違いはみられなかった. なお, 200~400N 辺りにみられる変曲点は加力治具と母材との境界近傍での釘頭付近の局部的な曲げ降伏によるものではないかと考えている.

Fig.13 Relationship between load and displacement (SS: Steel nail).

Fig.14 Relationship between load and displacement (SUS: Stainless steel nail).

4.3.3 一面せん断耐力と診断機器による測定値の関係

Fig.15 と Fig.16 に腐朽期間と打ち込み深さの関係を示す. 辺材側からの打ち込みでは, 腐朽期間が長くなるに従い, 打ち込み深さが深くなる傾向がみられ, 打ち込み深さが最大となった 14 週目の値は, 腐朽初期段階である 4 週目の値から約 40%増加した. しかし, 心材側からの打ち込みでは, 4 週目から 14 週目までの増加率は約 12%であった. これは, 辺材側の方が腐朽の進行が速く, 加害が激しかったためと考えている. また, 18 週目の値が小さくなった理由は腐朽菌の活性が低かったことが考えられるが, 断定できるデータはなかった.

Fig.15 Relationship between penetration depth and duration of decay (Heartwood).

Fig.16 Relationship between penetration depth and duration of decay (Sapwood).

Fig.17 と Fig.18 に腐朽期間と降伏耐力の関係を示す. 鉄釘を打ち込んだ試験体では, 腐朽期間が長くなるに従い, 降伏耐力が高くなる傾向がみられた. これは, 試験体内で鉄釘が錆びることによる効果だと考えられ, 他の研究においても腐食の初期段階では同様の結果が報告されている^{9),15)}. しかし, ステンレス釘を打ち込んだ試験体では

そのような傾向はみられず、腐朽期間が長くなるに従い、降伏耐力がわずかに低下する傾向がみられた。

Fig. 17 Relationship between yield strength and duration of decay (SS: Steel nail).

Fig. 18 Relationship between yield strength and duration of decay (SUS: Stainless steel nail).

Fig.19 と Fig.20 に一面せん断試験における降伏耐力と打ち込み深さの関係を示す。降伏耐力は、完全弾塑性近似モデル¹⁶⁾による P_y を用いた。両方の釘ともに正負逆の傾向を示したが、ともに傾きがほぼ 0 に近く、相関係数も低い値となった。また、ステンレス釘が鉄釘と比較して多少ばらつきが小さかった。

Fig. 19 Relationship between yield strength and penetration depth (SS: Steel nail).

Fig. 20 Relationship between yield strength and penetration depth (SUS: Stainless steel nail).

4.3.4 木材腐朽後の一面せん断耐力の推定

現行の木質構造設計規準¹⁶⁾に則り、ヨーロッパ型降伏理論 (EYT) に基づいて釘接合の降伏せん断耐力を求めるとともに、実験結果との比較を行った。

EYT の降伏せん断耐力算定式は、以下のようになる。

$$P_y = F_e \times d^2 \times \sqrt{\frac{2}{3}} \times \gamma \quad (1)$$

ここで、 P_y : 単位接合部の降伏せん断耐力 (N)

F_e : 主材の基準支圧強度 (N/mm²)

d : 接合具径 (mm) SS: 2.45mm、SUS: 2.3mm

γ : 接合具の基準材料強度と主材の

基準支圧強度の比 (F/F_e)

F : 接合具の基準材料強度 (N/mm²) 690 N/mm²

本研究では、腐朽の程度に応じた釘接合の降伏せん断耐力を推定するために、第 3 章の打ち込み深さと支圧強度の関係より得た累乗近似曲線の式により、打ち込み深さごとの支圧強度を求め、これを用いて鋼板添え板釘接合の降伏せん断耐力 P_y を EYT 算定式から計算した。

Fig. 21 Relationship between yield strength and duration of decay (SS: Steel nail).

Note: — using the average of bearing strength, - - using the proposed formula of bearing strength for design, - · - using the standard bearing strength.

Fig. 22 Relationship between yield strength and duration of decay (SUS: Stainless steel nail).

Note: — using the average of bearing strength, - - using the proposed formula of bearing strength for design, - · - using the standard bearing strength.

打ち込み深さと EYT 算定式で推定した降伏せん断耐力との関係曲線を、Fig.21 と Fig.22 に鉄釘とステンレス釘とに分けて示す。鉄釘では実験値のばらつきが大きいものの、両図とも支圧強度の平均値を用いた EYT 算定式の推定曲線は、概ね実験の下限に相当していることが看取さ

れる．また，提案式を代入した値はより安全側の評価をし，今回実施した釘の径に対して降伏耐力を満足するためには 29mm 以上の打ち込み深さが必要であることがわかった．

5 結 言

腐朽したスギ材に打ち込まれた釘の一面せん断性能を推定することを目的として，腐朽したスギ材に打ち込まれた釘の一面せん断試験，腐朽した材を用いた支圧試験，これらを非破壊に推定するための診断機器を用いた打ち込み深さ計測を行い，これらの関係から検討した耐力推定式を提案した．その結果，EYT 算定式に支圧強度と打ち込み深さの関係式を代入することで，打ち込み深さからスギ材での鋼板添え板釘接合の降伏せん断耐力を推定できることがわかった．また，本試験の範囲においてスギ材における，現行の必要せん断耐力の閾値としては，打ち込み深さ 29mm が妥当であると考えた．

今後は，柱と土台の接合部などの耐力を評価していくために，繊維直交方向加力における釘の一面せん断耐力の推定値についても検討していく必要がある．また，本検討は釘長さ 45mm で実施しており，釘長さが変わると診断機器の打ち込み深さとの関係が変わることが考えられるため，長さをパラメータにした検討も必要である．加えて，樹種の違いによる差が大きいことが確認されたため，異なる樹種によるデータの蓄積が必要と考える．

本研究の一部は，科学研究費補助金（基盤研究（A）2246072：代表者：林康裕）により実施しました．実験においては，大分大学井上研究室の学生諸氏に多大な協力をいただきました．また，京都大学生存圏研究所全国共同利用研究・DOL/LSF の助成を受けました．ここに謝意を表します．

参 考 文 献

- 1) Japan Wood Preserving Association, "Diagnosis manual of the fungi and the pest damage of residential house for strategist", pp.98-110 (2004).
- 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 Housing and Wood Technology Center, "The durability design and control of maintenance and deterioration diagnosis for residential wooden house", pp.105-129 (2002).
- 4) 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).
- 5) 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).
- 6) H. Takiuchi, K. Sawata, T. Sasaki, Y. Okazaki, S. Doi, and Y. Iijima, "Embedding strength of wood exposed to decay fungi", Mokuzaigakkaishi, Vol.53, No.1, pp.46-51 (2007).
- 7) H. Kurisaki, H. Nakatani, "Lowering of the bolted connection strength by 'OOZURATAKE' decay", Collection of Annual Meeting of the Japan Wood Research Society, Vol.48, No.1, pp.443 (1998).
- 8) M. Toda, M. Mori, Y. Ohashi, and T. Hirai, "Effects of wood decay on the shear performance of nailed timber joint", Mokuzaigakkaishi, Vol.56, No.1, pp.41-47 (2010).
- 9) H. Ishiyama, M. Koshihara, "Experimental study on the performance of the nailed joint with the rust: study on the structural performance of wooden house when deteriorated (Part1)", Journal of Structural and Construction Engineering, Vol.74, No.646, pp.2281-2289 (2009).
- 10) S. Soshiroda, "Mokuzainofukyudotokugihikinuki tairyo kudotonokankei", Reports of Architectural Institute of Japan, No.21, pp.147-150 (1953).
- 11) S. Soshiroda, "Mokuzaifukyudotosokuteikinoshisakutoso nosokuteichi", Reports of Architectural Institute of Japan, No.10, pp.297-300 (1951).
- 12) Y. Abe, "Decay of coniferous wood caused by *Merulius lacrymans* and their effect on the compressive strength of the wood", Hokkaido Ringyoushikennshuuhou, No.68, pp.23-36 (1959).
- 13) M. Takahashi, K. Nishimoto, "Studies on the mechanism of wood decay (I): changes in strength of BUNA and SUGI wood as decay proceeds", Wood Research, No.41, pp.75-89 (1967).
- 14) Architectural Institute of Japan, "Standard for structural design of timber structures", pp.223 (2006).
- 15) K. Kamiyama, K. Hijikuro, S. Yasu, "Kugisetugouno taikyuseini kansuru kenkyu", Collection of Architectural Institute of Japan Kanto Branch Architectural Research Meeting, No.50, pp.221-224 (1979).
- 16) Architectural Institute of Japan, "Standard for structural design of timber structures", pp.369 (2006).