シロアリ被害を受けた木質部材の打撃音診断法とそのめり込み性能評価

A STRENGTH ESTIMATING METHOD OF PARTIALLY COMPRESSION PERPENDICULAR TO THE GRAIN OF THE TIMBER DAMAGED BY TERMITE

野口昌宏*, 宮澤健二**
Masahiro NOGUCHI and Kenji MIYAZAWA

We, in this article, propose an estimation method of the partially compression of the timber damaged by termite perpendicular to the grain. The estimation method was composed of the three parts, easy ways for judging existence or nonexistence of termite, detailed percussive analysis for quantitative estimating lack of the area by termite, and mechanical model for estimating partially compression of the termite timber perpendicular to the grain using lack of the area. The easy ways are conventional ways using observation, sounding of stroke and resisting presser of the screw driver, but originally proposed the concept of 500 effective lengths. Detailed percussive analysis was originally proposed frequency analysis of sound wave. The mechanical model was originally proposed.

Keywords : STRENGTH ESTIMATION METHOD, PARTIALLY COMPRESSION, PERPENDICULAR TO THE GRAIN

強度算定法、めり込み強度、繊維直角方向

1. はじめに

比較的大規模な地震が発生すると多数の木造住宅の倒壊がニュースで報道される。我が国では既存木造住宅の耐震性向上が現在の社会問題といえる。木造住宅の耐震診断・補強は、一般的には、日本建築防災協会発行の「木造住宅の耐震診断と補強方法（2004年改訂版）」¹⁾に基づいて行われている。このマニュアルは、上部構造については最新の耐震性に関する知見を取り入れた信頼性が高い診断法と考えられるが、蟻害・腐朽等の劣化診断、基礎や地盤は、研究報告が少なく具体性を欠く部分や根拠の論理性の欠く信頼性の低い部分が目立つ。これらは、木造住宅における蟻害・腐朽の力学特性や基礎・地盤についての研究報告が少なく、得られている情報や知見が少ないのが原因と考えられる。本論文ではこれらの内の蟻害を受けた木質部材に焦点を当てた。

木質部材の蟻害被害は、多くの地震被害調査の分析から、地震被害や倒壊の要因となり耐震性能に大きく影響すると指摘されている^{2,3,4)}。しかし、公表されている蟻害木質部材の強度データは少ない。蟻害木質部材の力学性能は、生物学や化学中心の木材劣化・保存分野と、力学中心の木質構造・木材強度分野の境界部にあたるため、両分野の研究者とも手を出しにくかったためであろう。

我々はこれまで蟻害木材の全面横圧縮について、強度データの整備及びそれに基づく強度低下力学モデルを構築してきた⁵⁾。本報告では、被害を受けるケースが最も多い土台を想定しためり込み強度低下と被害率（欠損率）の関係を説明する論理的モデルの構築と打撃での詳細診断の可能性の把握を目的とした。

さらに、蟻害診断法についても、検討した。蟻害の程度を判断する診断法は大きく分類すると3つの方法がある。①目視、打診、やドライバーの圧入抵抗から人間が感覚的に判断する方法、②ビロデインやドリルなどの穴をあけて蟻害穴の存在を調べる方法、③超音波伝達速度測定やアコースティック・エミッション(AE)等の精密機器を用いた方法である。①と②の方法については、我々の既往の研究⁶⁾から、診断値と横圧縮強度の関係はばらつきが大きいために、横圧縮強度の診断に用いるのは不適切であることが分かっている。③については、力学特性のデータの報告は多少あるが、論理的な(算定的)な研究は無く、かつ、データもそれほど報告されていない。つまり、樹種、寸法、含水率、密度や木材独特の欠点などの諸々の条件が少しでも異なれば強度性能の推定には対応は困難と考えられる。長期的な視点では、今後期待できる方法とも考えられる。ただし、住宅耐震診断は床や壁などを剥がさない非破壊的な診断が一般的であり、部材の1つの面しか診断できない制約があること、耐震性が不足しているといわれる1000万戸の既存木造住宅の蟻害診断にこのような特殊な装置が必要であるということ等を考えると残存強度を推定するのに課題が多いように思われる。以上のように、決定的な方法はないという観点から、現在行われている①の方法の打撃音を詳細に分析し、被害率（欠損率）と音波特性に関係を見つけたので、それに基づく診断システムを提案する。なお、現時点では、この評価法は腐朽材には適用にできず、適応範囲を広げるためには更なる検討が必要である。本論文では、蟻害木材のめり込み特性診断法を提案する。第2章では、実験方法について説明する。第3章では、実験結果の

* 秋田県立大学木材高度加工研究所 流動研究員・農博

Postdoctoral Fellow, Institute of Wood Technology Center, Akita Prefectural University, Dr. Agr.

** 工学院大学建築学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kogakuin University, Dr. Eng.

概要について述べる。第 4 章では、実験結果の定量的考察と診断法を提案する。

2. 実験方法

2.1 供試体の用意

蟻害木材は、製材をイエシロアリの飼育槽に設置し、食害させることにより用意した。シロアリの食害は京都大学生存圏研究所のイエシロアリの飼育槽で行った。樹種はベイマツを用いた。木取りは、心持ち材、心去り材を半分ずつ用意した。実験用シロアリ飼育槽の上に、直接食害用木材を設置し（写真 1）、その上にプラスチックのボックスで覆った。2 つのボックス内に $105 \times 105 \times 800$ (mm) のベイマツ製材（平均密度: 519 kg/m^3 , CV: 0.059）をそれぞれ 8 本ずつ合計 16 本を立てて設置した。設置してから 12 週間後、木材をシロアリ飼育槽から取り出した。めり込み試験には全ての試験体を、打撃音収録、精密診断法には各層から 4 体ずつ計 8 体用いた。シロアリ被害の程度として、式（1）に示す欠損率を用いる。欠損率の算出には、CAD の面積測定機能を用いて行った。部材を切断して木口面を撮影した画像を CAD に貼り付け、シロアリが食べた跡と見られる場所を囲いその内側の面積を測定した。計測場所は、めり込み試験終了後に、一本の材を 100mm 間隔で 8 つに切断し、それぞれの木口面（切断面）での欠損率を算出した。それぞれの区間の欠損率は、木口面（切断面）での欠損率の平均値とした。

$$\text{欠損率} = \frac{\text{食害の面積}}{\text{切断した木口面の面積}} \quad \dots (1)$$

写真 1 供試木質部材設置状況

2.2 打撃音の録音

マイク（周波数帯域：20～16000Hz、入力インピーダンス：2.2K Ω 以下、入力感度： -54 ± 3 dB）と録音ソフト（onkai2）を用いて打撃音をパソコンに電子データ（wav ファイル）として取り込んだ。試験体は、蟻害層の各層から任意に 4 体ずつ計 8 体と健全材 1 体を対象とした。なお、蟻害層の各層から任意の 1 体ずつは、4 全面で測定した。全測定点は 120、長さ方向のプロットは 56 プロットである。それぞれ、一本の材を 100mm 間隔で 8 つに区切った。そして、土台を想定して木材をコンクリートの床に直置きにし、それぞれの区間ごとに木槌を使い、木材の側面を 4 回ずつ打撃した。その 4 回の打撃音を 1 セットとして、収録及びデータ解析を行った。

2.3 めり込み試験

めり込み強度試験は、木質構造限界状態設計指針（案）⁶⁾ に準じて行った。ただし、それぞれの材の両端を用いて材端のめり込み試験を 2 回行った後、材の真ん中で材中央のめり込み試験を行った。試験概要を図 1 に示す。材中央めり込みは 13 体、材端めり込みは 35 体行った。なお、本来なら 16 体と 36 体のデータがあるはずであるが、変位計の故障でデータが取れていない試験体がありこの数になった。

図 1 試験概要

3. 実験結果

3.1 めり込み試験結果

図 2 から図 3 に材端めり込みの荷重－めり込み量曲線、中央めり込みの荷重－めり込み量曲線を示す。これらの図は、それぞれ材中央、材端めり込み試験の異なる欠損率を有するめり込み試験データを全て載せたものである。この図から、図 2 の太線と図 3 の点線で示すような極端にめり込み性能の低いデータが含まれていることが分かる。定量的には、4 章で考察する。

図 2 材中央めり込み全試験結果
但し、太線：最弱のデータ

図 3 材端めり込み全試験結果
但し、点線：最弱のデータ

3.2 打撃音収録の結果

図 4 に特徴的な例として、蟻害材（欠損率 12%）と健全材（欠損率 0%）の収録音波を示す。健全材の音圧は時間の経過とともに減衰して徐々に小さくなっているが、蟻害材は健全材と比べ急激に小さくなっており、蟻害材は健全材より減衰が大きいたことが分かる。この理由を検討するために、図 5 にそれぞれの音波の開始を 0 秒とした場合の 0.005 秒から 0.006 秒までの波形を引き延ばして示す。健全材は減衰をもつ自由振動のような整った波形であるが、食害材は凹凸のある波形がでている。これは、打撃音が様々な大きさの蟻害穴で共鳴し、その結果として、様々な基本周波数をもつ音波が入り混じり、それらが干渉合っているためと考えられる。この効果で蟻害材の減衰が大きくなったと考えられる。

図 4 音の波形（ただし縦軸は音圧）

図 5 発音時の波形（ただし縦軸は音圧）

4. 考察

我々は、図6の(a)に示すように診断方法とめり込み残存強度推定を、直接関係つけるのではなく、図6の(b)に示すように被害率(欠損率)をパラメータとして、診断方法と欠損率、欠損率とめり込み残存強度を論理的に関係つける方法をとる。なぜなら、診断方法と欠損率、欠損率と被害木材の力学特性をバラバラに扱った方が有効にデータベースを作れると考えているからである。

被害木材の強度についての研究をする内に、実際木造住宅の土台に使われているヒノキ、ヒバやミツガ等薬剤注入材等の耐蟻性のある樹種を蟻害層に設置してもなかなか食害が進まず、現時点では被害木材の入手が大変困難との認識に至った。木材の強度実験データは、樹種が変われば使えないという事情があるため、実験による大量のデータベースが必要になる。しかし、データの量産は困難との観点から、診断方法と欠損率、欠損率と被害木材の力学特性をバラバラに扱うことが効率的と考えた。

そこで、欠損率と被害木材の力学特性を、耐蟻性が低いといわれているベイマツを蟻害層に設置して、ベイマツの被害木材を入手した。そして、強度低減率について、実験だけではなく力学をベースとした比較的単純な被害木材の強度モデルを構築する。そして、別に、打撃音を用いて、診断方法と欠損率の関係を導く。

またもう一点として、腐朽を伴わないシロアリの被害は、一見の目視だけでは判断できない場合が多い。シロアリは木口面から木質部材に進入し、側面からはほとんど進入しないために、側面の観察から被害は判断できないためである。木材を蟻害槽で食害させた時の観察からも、このことは確認している。さらに、イエシロアリ被害の特徴としてまず挙げられるのは、ヤマトシロアリよりも乾燥に抵抗性が高いため、住宅の上部部材まで被害が及ぶことが多い。そのため、イエシロアリの被害被害は、建物の全体の部材、又は、継手や仕口などの木口面の出ている部分付近を調査しないと分からないことになる。そのため、時間のかかる詳細な診断法で全ての部分を診断することは、木造住宅では非現実的と考えられる。そこで、短時間で診断できる簡易診断法で定性的に全体を診断し、被害被害の疑いのある部分を詳細な診断法で診断する流れが合理的である。全体の診断システムとしては、定性的な診断ができる簡易診断と定量的な診断も可能な詳細診断が共に必要である。

まず、4.1で提案する簡易診断の精度について、著者らの既往の実験データを用いて再考察を行う。4.2で打撃音を用いて、診断方法と欠損率の関係を導く。4.3で力学をベースとした比較的単純な被害木材の強度モデルを構築する。

4.1 既発表のデータを用いた簡易診断法の精度の検討

今回の実験の対象とした被害木材でも、代表著者らにより簡易診断は行なった。しかし、被害診断が不慣れのために、見た目での先入観や他の診断値等の偏見が入り、データとして信頼できないデータとなったため、ここでの議論には含めない。本章では、著者らによる既発表⁵⁾の被害診断の専門家が診断を行ったデータを、診断値と欠損率についてまとめなおし簡易診断法の精度の検討を行う。なお、既発表の論文では、全面横圧縮強度と診断値のデータを示し、ばらつきが大きいという実験結果を述べたのみであり、本章での検討は、新しく考察しなおしたものである。なお、既発表論文では、ドリル穿孔抵抗による診断法も含んでいるが、ドリル穿孔抵抗による被害診断法は非破壊診断ではなく大きな欠点を作るため、今回のデータ解析から除外した。

4.1.1 既発表データの特性の分析(信頼性の確認)

まず、詳細なデータ解析を行う前に、これらのデータの特性及び診断結果としての信頼性を把握するために分析を行う。最も精度の出る条件として、図7に全ての面で診断した場合の診断値と欠損率の関係を示す。図7の(a)から(c)は、材軸方向に100mmの区間ごとに区切り、その区間ごとに全ての側面(4面)で診断した結果を平均した値を縦軸に示している。図7の(d)の縦軸は、図7の(a)から(c)の値を全て足し合わせた値となっている。これらの図から、大きな傾向としてはどの診断法を用いても、例外は若干あるが、シロアリ被害が認められる(欠損率がゼロでない)場合に診断値もゼロにはなっていない。また、大きく見ると、欠損率が大きくなると診断値も大きくなっているような傾向がある。このことから、全ての面で診断できれば、被害被害の有無を簡易診断法で判定できるとも思われる。しかし、欠損率が5%以上でも診断値が0の場合が、70プロット中、図7(a)と(d)では1プロット、図7(b)と(c)では2プロットみられる。

図7 全ての面で診断した場合の診断値と欠損率の関係
ただし、プロット数:70点、(a)から(c)までの診断値:Appendix1の付表1から3による。(d)の診断値:目視・打診・ドライバー診断での診断値の合計

後述の5章の結果から欠損率が3%を超えると、実験値からは強度・剛性は極めて低くなり、本論文の提案算定式ではめり込み強度および剛性は0と評価することになる。つまり、全ての4面で診断

しても、強度的に致命的な見落としがあることが分かった。構造的には、材料強度は 95%下限値で評価していることから、同様な観点で見落としを見ると、1/70 や 2/70 の確立での見落としは、例外として判断できるが、注意事項としては、強度的に致命的な蟻害被害を見落とす事もあるため、現実的にはより多くの面で、且つ、より多くの部分で蟻害被害を調べて評価する方が、より適切に判断できると考えられる。ただし、4.1 で示したように、我々のような蟻害診断の非専門家には当てはまるかどうかは不明である。

図 8 に材軸方向の欠損率及び全ての面で目視・打診・ドライバー圧入診断をしてそれらを合計した診断値を示す。この簡易診断分析で用いる全ての材の結果を示している。ばらつきはあるが、材軸方向に欠損率が大きい部位は、診断値も大きくなっている。一つの材の中で、材軸方向での被害度（欠損率）の大小を大きな観点からはとらえているようにも見える。

これらのことから、一人の被害診断専門家の特解ではあるが、専門家の診断結果として解析する価値のあるデータと判断した。

図 8 材軸方向の欠損率及び診断値

但し、縦軸について：(■) は欠損率 (%)、(◇) は診断値 (点)

つぎに、既存木造住宅の実際の耐震診断での蟻害診断では、部材の 4 側面で診断できることはほとんどなく、1 側面や 2 側面で診断することになるケースが多い。そこで、1 側面のみで診断した場合を想定してまとめなおした診断値と欠損率の関係を図 9 に示す。なお、1 側面のみで診断する場合は全ての側面をそれぞれ 1 側面とした場合

の全ての組み合わせを対象として評価した。これらの図から、傾向が無く、蟻害被害の有無の判断も困難であることが分かる。図 9 と図 7 の比較から、より多くの側面で診断した方が精度が上がるということが分かった。図 9 で診断値と欠損率にほとんど関係がないようなグラフになったのは、1 つの側面で診断した場合、その向かい合う側面付近に被害がある場合に、診断精度が落ちるためであると考えられる。

図 9 一つの面のみで診断した場合の診断値と欠損率の関係
ただし、プロット数は、280 点

図 10 1 つの面で診断した場合の各診断値の相互関係

図 10 に一つの面で診断した場合の各診断値の相互比較を示す。目視、打診、ドライバー圧入診断法ともに約 70 から 80%程度の確率で同じ診断値となる事が分かる。しかし、これは、1 つの診断法だけで診断を行えばよいということではなく、このデータの各診断値は、他の診断値の影響も受けている可能性は否定できない。この検討については、追加データを収集して、分析しなおす必要がある。本論文では、目視、打診、ドライバー圧入診断法のいずれかだけでよいというのではなく、これら 3 つの診断法をセットに論じる必要があるという立場で論じる。

4.1.2 本論文で提案する簡易診断方法の注意事項

この節では、2つの注意事項を導くため、逆説的に以下に示す(1)および(2)の2つの方法を取り上げて、データ解析する。なお、本論文で提案する簡易診断方法は定量評価を目的としたものではなく、蟻がい被害の疑いがありかなしかの判断みのを想定している。そのため、診断する部分を多くしているのは、重み付けをするためではなく、見落としを少なくする目的で診断する部分を増やしているという理由である。

(1) 1側面のみでの診断方法 (方法1)

図11に示すように材軸方向に100mmずつに区切る。そして、診断したい部分及び両側の2つ分を診断してその合計を診断値とした。なお、材端部については、診断したい部分の隣が無い部分については、無しとした。具体的な例を以下に示す。

材端部(Aの部分の診断)

(Aの診断値)+(Bの診断値)+(Cの診断値)

Bの部分の診断

(Aの診断値)+(Bの診断値)+(Cの診断値)+(Dの診断値)

Cの部分の診断

(Aの診断値)+(Bの診断値)+(Cの診断値)+(Dの診断値)
+(Eの診断値)

(2) 2側面での診断方法 (方法2)

図11に示すように材軸方向に100mmずつに区切る。そして、診断したい部分及び両側の1つ分を診断する。そして、それらの合計と隣り合う側面での合計値を診断値とした。なお、材端部については、診断したい部分の隣が無い部分については、無しとした。隣り合う側面は1の場合は2、2の場合は3、3の場合は4、4の場合は1とした。具体的な例を以下に示す。

材端部(A1の部分の診断)

(A1の診断値)+(B1の診断値)+(A2の診断値)+(B2の診断値)

Bの部分の診断

(A1の診断値)+(B1の診断値)+(C1の診断値)+(A2の診断値)
+(B2の診断値)+(C2の診断値)

Cの部分の診断

(B1の診断値)+(C1の診断値)+(D1の診断値)+(B2の診断値)
+(C2の診断値)+(D2の診断値)

図11 提案する簡易診断法概要図

各面の番号	部位番号
1	A1 B1 C1 D1 E1 F1 G1 H1
2	A2 B2 C2 D2 E2 F2 G2 H2
3	A3 B3 C3 D3 E3 F3 G3 H3
4	A4 B4 C4 D4 E4 F4 G4 H4
長さ方向の 部位番号	A B C D E F G H

図12 部材の面及び長さ方向の部位区分番号

図13及び14に既存データを方法1及び方法2でまとめなおした場合の診断値と欠損率の関係を示す。なお、1側面のみで診断する場合は全ての側面をそれぞれ1側面とし、2側面で評価する場合は全て

の組み合わせを対象としそれぞれ評価した。これらの図から、方法1および方法2共に、図9の(d)に示す現在の診断法と比べて、蟻害被害があるのに診断値がゼロとなるケースが少なくなっていることが分かる。しかし、これらの診断値を用いて定量的に欠損率を推定するのは困難であると考えられる。

図15は方法1、方法2、および一つの面のみで目視・打診・ドライバー圧入診断を行った場合を想定した欠損率と診断見落とし率を示す。診断見落とし率は、蟻害被害(欠損率)があるにもかかわらず、診断値がゼロとなった割合を示す。例えば、横軸の欠損率が0.3-0.5%のプロットは、欠損率が0.3-0.5%までのデータ区間で、それぞれの診断法での診断値を計算する。そして、診断値がゼロの個数をその区間の総数で除した値である。この図から、従来の方法では、欠損率が0から1%では、被害があるにもかかわらず、約60%の確率で見落とししていることになる。それだけでなく、欠損率が2%以上でも、20から30%の確率で見落とししていることになる。5章で導くモデルでは、欠損率が3%付近でめり込み剛性がゼロとなる。このことから、欠損率2%以上の蟻害被害を見落とすことは、めり込み特性を診断(推定)する上で、致命的なことであると考えられる。なお、全ての方法の診断値は、同一の専門家による診断結果である。

一方で、方法1および方法2では、欠損率が0.3%以上の蟻害被害はほとんど見落とさないことが分かる。欠損率が0.3%以下の蟻害被害は、5章で導くモデルでは、めり込み剛性が約1割低下する被害程度であり、めり込みの力学特性の安全率などを考えると、致命的な見落としではないと考えられる。ただし、これらの診断は、多くの側面をやればやるほど、精度があがるため、3又は4側面を診断できる場合は、それら全ての側面で診断を行うべきと考えられる。つまり、診断精度を上げるためには、診断に使用する情報を増やす(測定点を増やす)ことが重要であると考えられる。

図13 方法1の診断値と欠損率
但し、プロット数は、280点

図14 方法2の診断値と欠損率
但し、プロット数は、280点

図15 欠損率と診断見落とし率

このデータは、一人の蟻害診断専門家の特解であり、仮説の域を出ないが、簡易診断で診断精度を保つために、上記のことからいえる最低限のルールをまとめると以下ようになる。①一面のみしか診断できない場合は、診断したい部分だけではなく、材軸方向に

両側 250mm ずつ診断を行い、それら 500mm の区間のどこかでゼロでない診断値がつけば、診断したいその部分は、蟻害の疑いがあると判断すべきであろう。②2 面診断で場合は、診断したい部分だけではなく、材軸方向に両側 150mm ずつ診断を行い、それら 300mm の区間のどこかでゼロでない診断値がつけば、診断したいその部分は、蟻害の疑いがあると判断すべきと考えられる。

4.2 打撃音による蟻害木質部材精密診断法

音波を周波数分析する場合は、一般的に、縦軸に dB(デシベル)をとりパワースペクトルで表し、そのスペクトル全体の形から音や音色を評価する場合が多い。しかし、本研究での目的は音色の評価等ではなく、蟻害材の診断である。dB(デシベル)は、音圧を対数に変換したものであり、小さな音圧の差を確認することが難しい。そこで、ピークがより明確に出る方が、より明確に判断が下せると考え、縦軸の単位を dB ではなく、対数を外した音圧 (リニア値) とした。

図 16 に蟻害材と健全材のパワースペクトルの一例を示す。なお、収録した音を 1 セット (4 つの打撃音) ごとに分析し、縦軸はリニア値とした。健全材では、第一卓越周波数は 700Hz 付近に、第二卓越周波数は 1400Hz 付近に現れた。一方、蟻害材では、第一卓越周波数は 550Hz 付近に、第二卓越周波数が 1200Hz 付近に現れ、第一・第二卓越周波数共に健全材のそれらより 79%、86%と小さくなっている。打撃音が様々な大きさの蟻害穴で共鳴し、卓越周波数が小さくなったと考えられる。

図 16 打撃音の power スペクトル (ただし縦軸は音圧)

また、注目すべき相違点として、健全材での打撃音では見られないが、蟻害材では 800Hz 付近にも卓越が見られることである。ここで、蟻害卓越周波数は、第一卓越周波数と第二卓越周波数間でそれらの影響をできる限り除去することを考慮して、各卓越周波数間を 4 分割し、その中心 2 つの区間での卓越周波数と定義した。本論文の場合では、具体的には、蟻害卓越周波数は 875Hz から 1225Hz である。蟻害卓越周波数の発生要因も、打撃音が様々な大きさの蟻害穴で共鳴し、第一卓越周波数と第二卓越周波数が減衰及び干渉しあって、それぞれの卓越周波数間に卓越周波数が現れたものと考えられる。一般的に蟻害材の打撃音には空隙音が含まれるといわれているが、この第一・第二卓越周波数の低下と、800Hz 付近の卓越が打撃音の変化として聞こえてくるものだと考えられる。

図 17 に第二卓越周波数と第一卓越周波数のリニア値に対する第二卓越周波数におけるリニア値の比の関係を示す。円で囲った付近のプロットは健全材のデータである。健全材と蟻害材を比較すると、第一卓越周波数のリニア値に対する第二卓越周波数のリニア値の比は、健全材ではおおむね 40% 未満である。欠損率 3% 未満の蟻害材では 10% から 90% までの値で分布している。欠損率 3% 以上の蟻害

材では健全材と正反対の 40% 以上の値となっている。さらに第二卓越周波数については、1500Hz と一定の値であるが、欠損率 3% 未満の蟻害材では 700Hz 付近に集中し、欠損率 3% 以上の被害の大きい蟻害材では 300Hz から 1200Hz までの範囲に分布している。つまり、蟻害を受けることで、一卓越周波数のリニア値に対する第二卓越周波数のリニア値の比は大きくなり、また、第二卓越周波数も第一次周波数の 2 倍ではなく 300Hz から 1200Hz までと大きな範囲の中に分布していることが分かった。この特徴は蟻害診断に利用できると考えられる。

図 17 第二卓越周波数とリニア比率

図 18 蟻害卓越周波数とリニア比

図 18 に欠損率と第一卓越周波数のリニア値に対する蟻害卓越周波数におけるリニア値の比の関係を示す。第一卓越周波数のリニア値に対する蟻害卓越周波数のリニア値の比は、欠損率が大きな場合、大きい値をとっている事が確認できる。その値は、安全側で評価すると欠損率の 2 倍、中央値で評価すると欠損率の 5 倍となる。この関係は、打撃診断で欠損率を定量的に推定する一つの手段として有効なデータでと考えられる。

(a) 欠損率と卓越周波数の関係 (b) 図 19(a) の円で囲った部分の卓越周波数の詳細データ

図 19 欠損率と卓越周波数

図 19(a) に欠損率と第一卓越周波数の関係を示す。欠損率が大きくなるにつれて第一卓越周波数が直線的に小さくなっている。この直線関係を用いれば打撃診断で欠損率が推定できることが示唆された。

実際の診断に使えるように回帰直線を求める。ただし、円で囲ったものは例外として扱った。図 19(b)に、図 19(a)の円で囲った部分の卓越周波数の詳細データを示す。横軸は 2.2 節で示したように、4 回の打撃音を一セットとして周波数分析した場合の卓越周波数を示し、縦軸は図 19(a)の円で囲った部分に該当するデータをより細かく 1 回の打撃音を用いて周波数分析した場合の卓越周波数を示している。この図より、図 19(a)の円で囲った部分に該当するデータをひとつひとつ見ると、非常にばらつきが大きいこと、一つのセットの中には、卓越周波数が小さくなったデータが得られている事が分かる。一方、縦軸は図 19(a)の円で囲った部分以外のデータをひとつひとつ見ると、同一セット内では 20HZ 以内の変動がほとんどであった。これらのことから、図 19(a)の円で囲った部分に該当するデータは、たたき方の不同、木材の表面性状などのために、一セット内での音波がばらついたために、第一卓越周波数が健全材のそれより大きくなったものと考えられる。また、理屈的にも、蟻害被害を受けて木材が弱くなることは振動的にも、物体の剛性が小さくなり、周波数が小さくなることが予想される。これらのことから、本研究では、図 19(a)の円で囲った部分に該当するデータは、例外として扱った。求めた回帰式は、(健全材の第一卓越周波数) - 11.4 × (欠損率) で表せる。

以上の知見を 1 つの診断システムとしてまとめなおすと、以下の手順となる。ただし、樹種特性などは検討しておらず、現時点では、ベイマツにしか適応できない。今後、汎用性を広げるためには下の枠内の⑧に示す回帰式のデータベース化が必要になる。また、診断の注意点としては、第一卓越周波数が健全材のそれより大きくなった場合は、診断する場所を増やし、第一卓越周波数が安定して得られるように工夫する必要がある。

打撃音による一つの診断法(案)の提案

- ①打撃音を収録(マイクの周波数帯域：20～16000Hz)
- ②パワースペクトルを作成(ただし、縦軸は音圧)
- ③全区間での第 1・第 2 卓越周波数、蟻害卓越周波数とそれぞれの音圧を求める。
- ④ $A = \frac{\text{全区間の第 2 卓越周波数の音圧}}{\text{全区間の第 1 卓越周波数の音圧}}$ を求める。
- ⑤ $B = \frac{\text{蟻害卓越周波数の音圧}}{\text{全区間の第 1 卓越周波数の音圧}}$ を求める。
- ⑥ $C = (\text{健全部の第 1 卓越周波数}) - (\text{診断部の第 1 卓越周波数})$ を求める。
- ⑦蟻害被害の有無の診断
 - 1) 診断部の第 2 卓越周波数と健全部の第 2 卓越周波数を比べて明らかに小さければ蟻害被害あり、その他の場合 2) で検討する。
 - 2) A の値が 40 以上になれば蟻害ありと判断する。
- ⑧蟻害ありの場合、欠損率は以下の式により算定した小さい方で算定する。

$$\text{欠損率} = \frac{B}{5} \quad \text{欠損率} = \frac{C}{11.4}$$
- ⑨⑧で求めた欠損率を用いて、3 章のめり込み算定式でめり込み強度等を算定する。

5. 蟻害木質部材のめり込み特性の算定法の誘導

木質部材のめり込み強度(部分圧縮強度)は、支柱部周辺に十分な余長がある場合、全面横圧縮強度と比べてはるかに強いことはよく知られている。例えば、今回の実験条件では、日本住宅・木材技術センター「木造軸組工法の許容応力度設計」⁷⁾で示されている算定式を用いると、材端および材中央めり込み強度はそれぞれ全面横圧

縮強度の 1.77 倍、2.60 倍になる。蟻害被害を受けた木質部材のめり込み特性については、この余長部の効果(余長効果)をいかに扱うかが重要になる。5.1 で材長方向のモデル化の方針(余長効果の考え方)を、5.2 で木口面のモデル化と有効材幅の導出を行う。

5.1 材長方向のモデル化(余長効果の考え方)

5.1.1 力学モデル化のための仮定

- ・材長方向に蟻害穴が一様に存在。
- ・材幅方向に任意の位置で分離・結合が可能。
- ・健全な部分のめり込み特性は稲山式^{7,8)}で算定可能。

5.1.2 線形域の想定・モデル化

(対象とする特性値：初期剛性、降伏強度)

線形域では、加圧板直下部とその周辺の余長部が共に弾性域である。力学の簡易モデル化では、抵抗要素をいくつかの部分に分けてそれぞれ弾性バネにモデル化してそれらを並列バネとして結合する方法がある。本報告では、図 20 に示すように蟻害穴を含む部分と含まない部分を幅方向に分離して考える。そして、分離した部位ごとに、線形域及び降伏後の終局域それぞれの耐力発現機構を想定・モデル化する。最後に、分離した部位を再び並列系で結合しめり込み特性値を算出する流れで考える。

まず、蟻害穴を含まない部分(健全有効幅の範囲)は、健全な木材と同様に扱い、余長効果もカウントする。つぎに、蟻害穴を含む部分(蟻害有効幅の範囲)には、力が流れないと考える。この根拠を以下に議論する。図 20 に材軸方向の概念モデル、図 21 に木口断面での概念モデルを示す。材軸方向の概念モデルは、蟻害木質部材を、蟻害穴を含む部分と含まない部分を幅方向に分離した図である。後に並列系で結合すると考えるため、それぞれの材端付近に同一強制変位を与えた場合を考える。そうすると、健全部分は健全材と同様に抵抗するが、蟻害穴を含む分離された部位は、穴がつぶれるだけで外力に対して抵抗しない。また、木口断面での概念モデルで考えてみても、蟻害を含む幅方向部分には反力がとれないために力が流れないと考えるのが自然であろう。

図 20 蟻害穴をもつ木質部材の材軸方向のモデル概念図

図 21 木口面のモデル概念図

一方で、余長部では幅方向に力が流れるため、余長効果だけは発揮されるのではとの疑問もわいてくる。しかし、木材の三軸直交異方性のために、材長方向には力が流れやすいが、材幅方向ヤング率が材軸方向の約 1/25 倍程度と低く、かつ、材幅方向には応力の拡散が生じにくいから、ほとんど力が流れない。このことは、稲山のめり込み算定⁸⁾で材幅方向が材長方向の 1/5 や 1/8 (n の値) を採用していることでも分かる。したがって、蟻害穴を含む部分(蟻害有効幅の範囲)には、加圧板直下部と余長部共に力が流れないと考えた。

5.1.3 FEMによる有効幅の検討

図 21 に示す有効幅の力学モデルの妥当性確認するために、3D の有限要素法による検討を行った。図 1 の (b) に示す材端めり込みを対象に FEM を用いて、線形解析を行った。図 22 に検討モデルを示す。蟻害穴は、芯持ち材を想定し、xy 平面の真ん中を中心とした、直径各辺の半分 (52.5mm) の半円とした。FEM モデルは 2 つ用意した。1 つ目は、図 22 (a) に示すように蟻害穴を設定したモデルである (モデル A)。2 つ目は、図 22 (b) に示すように蟻害穴を設定したモデルである (モデル B)。蟻害穴は、金太郎飴のように、材軸方向にどこで切っても同じ蟻害穴があらわれるように、xy 面は材軸方向に様にメッシュを切った。木口面のメッシュは、図 (a) および (b) に示すように、4 辺をそれぞれ 11 分割、蟻害穴を 18 分割となるように自動メッシュ分割した。節点は 15964 点、要素数は 13850 個である。用いた材料乗数を表 1 に示す。図 23 に有限要素法での線形解析結果を示す。モデル A 及びモデル B 共に、蟻害穴を含む蟻害有効幅の範囲には、細かい観点からは力が流れているが、大きな観点からはほとんど圧縮応力が流れていないことが分かる。このことから、図 23 に示す有効幅の力学モデルは、おおむね妥当であると判断した。

記号	値
E_x	15700 N/mm ²
E_y	780 N/mm ²
E_z	780 N/mm ²
G_{xy}	872 N/mm ²
G_{xz}	872 N/mm ²
G_{yz}	400 N/mm ²
μ_{xy}	0.49
μ_{xz}	0.49
μ_{yz}	0.39

図 22 有限要素法での線形解析

図 23 有限要素法での線形解析結果 (x 方向の軸方向応力分布)

5.1.4 終局域での想定 (対象とする特性値：終局強度)

まず、加圧板直下部と余長部を分離して考える。終局強度算定基準値の 20mm めり込みが進んだ状態では、加圧板直下部は、ほとんどの蟻害穴がつぶれて断面欠損が無くなると考える。なぜなら、蟻害

穴の直径 (3mm) とすると、木口面において、材せい方向に独立した 6 つの蟻害穴がつぶれる、又は、材せいが 105mm の場合では体積約 20% がつぶれる。つまり、最も弱い空隙である欠損率 20% 分の蟻害穴がつぶれて塞がると考えるのが自然であろう。したがって、強度は断面欠損の無い健全な全面横圧縮強度と同等と考えた。一方、余長部は、加力部と比べめり込み量は小さい。図 24 に示す概念図のように蟻害穴を含む部分の余長部の蟻害穴はほとんど閉じ余長部には力が流れないと考えた。したがって、蟻害穴を含む部分余長効果はカウントできないと考えた。ただし、蟻害穴を含まない部分 (健全有効幅の範囲) は、健全材と同様に余長効果をカウントする。

図 24 材軸方向の終局域の概念図

5.2 木口面のモデル化と有効材幅の導出

5.2.1 木口面のモデル化の方針

シロアリによる加害想定は生物的行動に基づくため予測するのは難しい。一度シロアリが木材にアタックすれば、同一年輪内で材軸方向に加害していくことは被害観察からよく知られている。これは、年輪内の晩材が早材に比べ密度が高かったためシロアリが好まいたためである。一つの穴で加害が進んでいけばシロアリの分泌する道しるべフェロモンに誘導されて他のシロアリがきて自ずと同一年輪内の被害穴が大きくなる。そこで、本モデルでは、一部の年輪内で集中被害を受けると考える。また、シロアリが何年目の早材を加害するかはランダムであると考ええる。数個の年輪に集中している場合もあるが、穴の大小を関係なく穴の個数のみで考えるとどの年輪にも加害があり傾向が確認できないためである。

力学モデル化の流れは、等価蟻痕跡長さ l_e を求め、それらをモデルに蟻害穴長さとして割り振り、強度低減率の算出である。等価蟻痕跡穴長さ l_e は、通直の幅 r mm の等価な蟻害痕跡穴に置き換えた場合の等価蟻痕跡穴長である。欠損率では被害をイメージしにくいいため、被害の大きさをよりイメージしやすい等価蟻痕跡穴長を定義し、用いる。木口面の断面積 A 、欠損率 a (%)、蟻害穴の幅 r を用いて、等価蟻痕跡長さ l_e は以下の式で表現できる。

$$l_e = \frac{Aa}{r} \quad \dots (2)$$

なお、 r の値は、生物による被害なために不確定であり、かつ、その値は圧縮強度に影響するが、本研究で観察された蟻害穴の直径として $r = 3\text{mm}$ とした。

5.2.2 有効材幅の導出

図 25 に一部の年輪内で集中被害のモデル化を示す。最も厳しい評価として心持ち材モデルを用いて以下導く。この場合、蟻害穴で分離された年輪の中心側の部位は反力がとれないため、圧縮力を負担できない。

蟻害穴の回転角度は、一つの年輪部の等価蟻痕跡長さと n 番目の年輪を円と考えた場合の半径 R から比の計算で以下に求まる。ただし本論文では、2 章で説明した供試体の平均年輪幅が 3.24mm であること、及び、既往の研究⁵⁾を参考に $R=3n$ とした。

$$\theta = \frac{l_e}{R} \quad \cdots (3)$$

図 25 被害想定モデル

つぎに有効幅 b_e を求める。年輪の半円の中心を原点とし、図 25(a) の下向きに x 軸を正、左向きに y 軸を正とすると、有効幅 b_e は幾何学的に以下に求まる。

$$b_e = (b - 2R \sin \frac{\theta}{2}) \quad \cdots (4)$$

ここで、式(4)の特徴を見るため、 n 及び a をパラメータとしたパラメトリックスタディを行った。被害を受けた年輪層を1年輪から18年輪までを想定して、 n を1, 3, 5, 10, 15, 18の6条件とし、それらについて、欠損率を0%から10%までを想定し、 a を0から10まで0.1づつ変化させた。 A は実験に合わせて $120 \times 120 \text{ mm}^2$ とした。結果を図 26 に示す。式(4)は、周期関数である。各々の曲線で意味があるのが最初の1/4周期の部分である。この部分は、欠損率の増加に伴い図9から、1/4周期の部分はほぼ重なっており、18年輪すなわち、つまり、最外周年輪に被害を受けると想定して計算しても差がほとんどでないことが分かった。したがって、辺に接する円の半径 $R = b/2$ を用いて有効幅 b_e を以下として導出した。

$$b_e = (b - b \sin \frac{\theta}{2}) \quad \cdots (5)$$

図 26 被害を受けた年輪層をパラメータとした欠損率と有効幅倍率但し、有効幅倍率は有効材幅を材幅で除した値、正弦カーブは周期が小さい順に中心から一年輪目、2年輪目、...n年輪目の計算結果

以上の知見を算定法としてまとめなおすと、以下の手順となる。

蟻害木質部材のめり込み特性値算定式

・めり込み剛性 K

$$K = kb_e t$$

・降伏強度 P_y

$$P_y = \frac{2}{3} f_m b_e t$$

・終局強度 P_u

$$P_u = f_m b_e t + f_{mn} (b - b_e) t$$

ただし、

$$b_e = (b - b \sin \frac{\theta}{2}) \quad \theta = \frac{l_e}{b}$$

k : 健全材のめり込み剛性 (稲山式⁷⁾、余長効果を含む)

f_m : 健全材のめり込み基準強度 (部分圧縮として)

f_{mn} : 健全材のめり込み基準強度 (全面圧縮として)

t : 材料方向の支圧長さ

5.3 提案算定式での算定値と実験結果との比較

図 27 から図 29 にそれぞれの特性値ごとの実験値・許容値・提案算定値 (以後算定値) の比較を示す。降伏強度および終局強度の許容値は、それぞれ、平成 13 年国交省告示第 1024 号に示されているベイマツめり込み短期許容応力度および基準強度を用いた。(◆) は実験値を、(—) は健全材の場合の許容値を、(—) は算定値を示す。

まず、許容値と実験値の比較を行う。ばらつきが大きい、全ての特性値で、欠損率が2~3%程度で許容値を下回り、欠損率が3~5%くらいで強度や剛性が1/4以下になることが分かる。このことは、3%程度の若干シロアリに被害を受けた部材でも、必要な構造性能が確保できず、補強が必要である可能性を示唆している。

図 27 降伏強度の実験値・許容値・算定値の比較
(—) 提案モデルの算定値、(◆) 実験値、(—) 健全材の許容値

図 28 めり込み剛性の実験値・許容値・算定値の比較
(—) 提案モデルの算定値、(◆) 実験値

図 29 終局強度の実験値・許容値・算定値の比較
(—) 提案モデルの算定値、(◆) 実験値、(—) 健全材の許容値

つぎに、構造安全性評価法に用いる算定式という観点、および、実現象のモデル化という二つの観点から算定値と実験値の比較を行う。降伏強度および終局強度について、材端・材中央めり込みともに算定値は安全側の値を与えることが分かる。材中央めり込みについては、欠損率が3~10%までの実験値が少ないが、材端・材中央めり込み特性が全く別のメカニズムであるとは考え難い。また、算定値は安全側の値を与えている。これらのことから、蟻害を受けた木質部材の材中央めり込みについても提案算定式は有効と考えられる。ただし、欠損率が5~13%の範囲で降伏強度および終局強度が急激に

は落ちず、過度の安全側となるプロット群がある。算定値は、欠損率が3%を超えると降伏強度は0となる評価になっている。実験結果からは、欠損率が10%を上回っているのにもかかわらず降伏強度が「許容値」を超えている事例もある。しかし、本算定式提案の目的である構造安全性評価法に用いるという観点からすると、めり込み性能は固定荷重や積載荷重のような常時作用する荷重に対する機能性の検討にも用いるため、十分な安全側の評価が大切と考えられる。したがって、構造安全性評価法に用いるという観点からは、安全側の評価をするという事から、提案算定式は有効であると判断できる。めり込み剛性について、材端めり込みは算定値は実験値の概ね下限値を示すように安全側の値を与えることが分かった。材中央めり込みは実験値が算定値を下回るものも多く観察され、危険側の評価をすることが分かった。これらの木取りを調べると、全てのプロットが図25(b)に示すような心去り材で、かつ、年輪の曲率が大きい場合であった。めり込み剛性も強度同様、常時作用する荷重に対する機能性の検討に用いることが想定されるため、十分な安全側の評価が大切である。大きな傾向を抑えるという面からは、妥当と考えられる。しかし、また、危険側の評価は、安全性検証法の前提を崩す原因となる事から、めり込み剛性の算定式は、追加実験による検証または安全率の設定、より合理的な診断法確立のための詳細のメカニズム解明が課題として残る。

一方、実現現象のモデル化という学問的な観点からは、強度については、欠損率が5~13%の範囲で降伏強度および終局強度が過度の安全側となる部分、および、初期剛性のより詳細なモデル化が課題である。前者については、本論文のモデルは、構造安全性評価法に用いるという観点を重視し、安全側およびより簡易化の面から、5.2の木口面のモデル化と有効材幅の導出では、一部の年輪内で集中被害を受けると考えモデル化を行ったことが、前者の理由と考えられる。より学術的な実現現象を正確に説明するモデル化のためには、著者らの全面横圧縮強度を扱った既往の論文⁹⁾のように、木口面のモデル化を、一部の年輪内で集中被害を受ける場合だけでなく、集中被害を受ける場合、ランダムな被害を受ける場合を想定する事が有効と考えられる。特に、ランダムな被害を受ける場合を想定が必要と考えられる。後者については、公表されているデータも少なく、初期剛性が大変ばらつき、実験データの評価法が難しいため、実験データの備蓄、および、より合理的な診断法確立のための詳細のメカニズム解明が課題として残る。

6. まとめ

蟻害被害を受けた木質部材のめり込み特性の一連の診断法を議論し、提案した。ただし、現時点での適応範囲は、ベイマツのみである。また、以下の新たな知見も得られた。

- ・専門家の診断と欠損率のデータ解析から、簡易診断を行う場合の注意事項として、①一つの面のみでしか診断できない場合は材軸方向両側に250mmずつ診断範囲を設定すること、②二つの面で診断できる場合は材軸方向両側に150mmずつ診断範囲を設定することが必要との知見が得られた。
- ・音波の周波数解析に基づく打撃音での詳細蟻害診断法を提案した。
- ・欠損率とめり込み特性の関係を簡易な力学モデルによりモデル化を行い、算定法を提案した。実験により、おおむね安全側を推定す

ることが分かり、モデルの有用性を確認した。ただし、材中央めり込み剛性は実験値が算定値を下回るものも多く観察され、追加実験による検証が課題である。

謝辞

本研究を行うにあたって、工学院大学 学術フロンティア（宮澤健二代表）及び、京都大学 生存圏研究所 全国共同利用（DOL）および吉村剛准教授の協力を得た。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法（改訂版）、日本建築防災協会、2004
- 2) 日本建築学会近畿支部：1995年兵庫県南部地震—木造建物の被害—、日本建築学会近畿支部、1995
- 3) 日本木材学会：木造住宅の耐震、日本木材学会、1996
- 4) 今村祐嗣、角田邦夫、吉村 剛編：住まいとシロアリ、海青社、2000
- 5) 野口昌宏他：シロアリ被害を受けた木材の縦及び横圧縮強度、構造工學論文集、2008年
- 6) 日本建築学会：木質構造限界状態設計指針（案）・同解説、丸善、東京、2003
- 7) 日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計、日本住宅・木材技術センター、2001
- 8) 稲山正弘：木材のめり込み算定とその応用—靱性に期待した木質ラーメン接合部の耐震設計法に関する研究—、東京大学学位論文、1991

Appendix 1 簡易診断の診断基準

簡易診断に用いた診断基準を付表1~3示す。

付表1 目視診断の評点法

評価	判断基準
0	表面上に痕跡がない
1	少し食われた跡がある(1から2個程度)
2	明らかに食われ、その跡から内部が見える
3	木材表層がべらべらとしていてはがれる

付表2 打撃音診断（打診）の評点法

評価	判断基準
0	通常の打撃音
1	かすかに空疎音が感じられる
2	明らかに空疎音が感じられる
3	大きな空疎音がする

付表3 ドライバー圧入診断の評点法

評価	判断基準
0	ドライバーの先端貫入せず
1	ドライバーの先端の貫入量が5mm未満
2	ドライバーの先端の貫入量が5mm以上10mm未満
3	ドライバーの先端の貫入量が10mm以上

Appendix 2 既発表の蟻害木材の概要と診断方法

食害は京都市大学生存圏研究所のシロアリの飼育槽で行った。2本の4mのベイマツ製材（105×105mm）を付図2の上側に示すように5等分して、10本の105×105mm×800mmの試験体を作成した。その後、シロアリ飼育槽の上に直接食害用試料ボックスを設置し、そのボックス内に各試験体を立てて設置した。その後、1週、2週、4週、6週、8週後にそれぞれ2本ずつを取り出し、食害進行を停止させた。

劣化診断は目視、打診、ドライバー貫入、電気ドリル穿孔の方法で行った。ただし、本論文で再考察する対象は、目視、打診、ドライバー貫入である。診断基準は、Appendix 1と同様とした。全測定点は280点である。劣化診断は、劣化診断の専門家に依頼して行ってもらった。各試験体共に付図1の下側に示すように、01から08に示すように100mmごとに4面行なった。診断は10本の試験体全てで行った。

診断終了した後、全ての試験体の木口面の欠損率に加え、100mmごとの切断面での欠損率を算出した。算出にはCADの面積測定機能を用いて行った。CADに木口、切断面を撮影した画像を貼り付け、シロアリが食べた跡と見られる場所を囲いその内側の面積を測定し欠損率を算出した。

付図1 試験体の木取り

（2009年2月10日原稿受理、2009年10月5日採用決定）