木材腐朽と接合具の発錆が接合部の構造性能に及ぼす影響

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 公開日: 2021-04-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 和田, 央 メールアドレス: 所属: 大阪市立大学
URL	https://ocu-omu.repo.nii.ac.jp/records/2011476

大阪市立大学大学院　都市系専攻
修士論文概要集 2021 年 2 月

木材腐朽と接合具の発錆が接合部の構造性能に及ぼす影響

THE EFFECTS OF DECAYED WOOD AND RUST OF CONNECTOR ON THE STRUCTURAL PERFORMANCE

建築構法分野　　和田 央
Building Construction Method　Nakaba WADA

木造住宅を安全に長期間利用するためには改修方法を十分に検討することが必要であり、正確な構造性能の評価が重要である。特に接合部での木材劣化や接合具劣化が建物全体に影響を与える。しかし、これらを同時に考慮した研究は少なく、各劣化度合いを定量評価している事例も少ない。そこで本研究では、各劣化が接合部の構造性能に与える影響を実験的に検証し、各劣化度合いから単位接合部の最大せん断耐力を予測することを試みた。

Appropriate investigation is important for long-term and safety use of wooden house. In particular, the deterioration of the wood and connectors at the joints affects the entire building. However, there are few studies focusing on both of these. So in this study, the effect of each deterioration on the structural performance of the joint was experimentally verified, and the maximum shear strength of the single joint was tried to calculate from each degree of deterioration. The final goal was to predict the strength reduction of the entire building more accurately from the results of this study.

１．はじめに

木造住宅を安全に長期間利用するためには、改修や補修方法を十分に検討することが必要であり、その都度構造性能を正確に評価することが重要である。特に接合部での劣化が建物全体に影響を与える可能性があり、接合部における劣化として木材の生物劣化と接合具の発錆が挙げられる。これらの劣化は水分が共通因子であるため、同時に起こることが考えられる。

また、木造住宅の耐震診断における老朽化、劣化の診断では、木材や接合具の劣化度合いは定量評価がなされていないのが現状である [1]。木材の劣化については、一般診断法では目視での劣化箇所の数、精密診断法では打診や目視、ドライバーの刺さり具合で判断するため、いずれも診断者の主観による評価である。さらに、低減係数が一律に定められており、接合具の劣化についても引抜き診断するものの木材の劣化と同様に耐力は一律で低減されている。

そこで本研究では、劣化調査にて既存建物での劣化状況を定量的に把握し、筋かい接合部や柱脚部を想定した木ねじ単位接合部に木材腐朽と接合具発錆による劣化が同時に起きた際の接合部構造性能を実験的に検証した。さらに、既往研究 [2)3)]や本実験から木材腐朽と接合具発錆が接合部構造性能に与える影響のメカニズムを整理し、各劣化度合いから単位接合部の最大せん断耐力を予測することを試みた。本研究の成果から、実際の劣化調査で得た定量的な各劣化度合いで単位接合部の耐力低下を予測し、建物全体の解析に用いることでより正確な改修や補修方法の判断を可能とすることが最終目標である。

２．既往研究

これまで木造住宅の定量的な劣化調査に関して行われた研究は、以下の通りである。今村ら [4)]が釘の目視劣化度評価を定め、高含水率になる部位では特に釘の劣化が著しく、目視で木材腐朽も確認した。また、秦ら [5)]は 3 種の劣化測定器を用いて調査を行い、劣化判定にはピロディンが有効であり柱(スギ)の劣化判定閾値を報告した。しかし、どちらもデータ量としては少なく、木材及び接合具を同時に調査した研究はない。

さらに、本研究に関連する既往研究から木材腐朽と接合具発錆が接合部に与える影響をそれぞれ以下にまとめた。木材腐朽が接合部に与える影響については、様々な樹種や接合具の接合部のせん断試験や引抜試験が行われ、データが蓄積されつつある。腐朽が進むにつれて接合部の最大荷重は直線的に低下することなどを報告した [6)]。近年では様々な樹種や接合具を用いた接合部実験のデータベースの構築が進み、モデル化に関する研究も行われている [7)]。

また、接合具の発錆が接合部に与える影響は石山らにより報告された [3]。実験結果から、釘の発錆により発錆初期では最大せん断耐力が増加し、さらに発錆が進むと低下することがわかっている。また、接合具の変形が ModeⅢになる木ねじでも、釘と同じように発錆による最大せん断耐力の上昇がみられた [8]。

他にも、高梨ら [9]は木材腐朽と釘の発錆が釘の引抜耐力に与える影響を実験的に確認し、木材腐朽が起きていても釘の発錆により耐力が上昇したと報告している。ただし、釘の劣化に関する研究は多数行われているが木ねじに関するものは少なく、さらに木材腐朽と同時に考慮している研究はほとんどない。

3. 劣化調査

3.1 調査概要

本調査では解体や改修が行われる 3 物件にて部材の劣化度合いを確認した。表 1 に 3 物件の概要を示す。

本調査で用いた定量的な劣化度評価方法は以下に示す。接合具の劣化度評価は目視で錆と損傷の程度から 5 段階に評価した今村らの劣化度評価基準 [4] (表 2)を参考とした。劣化度は 0.5 単位で評価しており、多くの人の個々の評価がほとんど一致するとされている。木材の劣化度評価はバネの力でピンを一定の力で木材に打ち込み、その打ち込み深さで木材の劣化度合いや密度を測定できるピロディン(図 1)を用いた。現場でのピロディン打ち込み試験の様子を図 2 に示す。

3.2 佐賀県鳥栖市　木造住宅

図 3 に測定箇所ごとの接合具の劣化度と平均劣化度を示す。浴室周辺から採取した釘のみ劣化度 5 であり、その他は劣化度 2.5～3 が多かった。

3.3 愛知県豊橋市　木造住宅

健全部として 1 カ所、劣化部として 6 カ所から採取した釘の劣化度を図 4 に示す。健全部では劣化度 2、劣化部では劣化度 3～3.5 程度であり、最も劣化しているものは劣化度 5 で北東 2 階から採取した釘であった。

3.4 大阪府大阪市　木造アパート

土台と柱から木材劣化度、その周辺で採取した釘から釘劣化度を評価した。測定箇所ごとに各劣化度を図 5 に併せて示す。木材腐朽部分と健全部分の差が大きいほど木材劣化していると考えると、雨どいがあり隣の建物が近く日陰になっていた南西側外壁と風呂場の劣化度合いは他に比べ大きかった。

3.5 各調査結果 まとめ

木材及び接合具両方の劣化度合いが大きい測定箇所は浴室周辺の 1 カ所であった。その他築年数・方角・高さと各劣化度合いに傾向はみられず、木材劣化度合いが大きい箇所でも必ずしも接合具劣化度合いが大きいとは限らず、各劣化度の組み合わせは様々なパターンがあることを確認した。

表 1. 劣化調査概要

調査日	2019/7/28	2020/9/4	2020/9/23,30
所在地	佐賀県鳥栖市	愛知豊橋市	大阪府大阪市
建物概要	2階建て木造住宅	2階建て木造住宅	2階建て木造アパート
築年数	1階：築37年	築31年	築58年
調査内容	釘、かすがい 目視劣化度評価	釘 目視劣化度評価	木材 ピロディン打ち込み試 釘 目視劣化度評価

表 2. 今村らの釘の劣化度評価基準 [4]

劣化度	基準
1	微小さび
2	表面部分的さび、肉眼的損傷なし
3	表面全面さび、内部健全
4	部分的損傷、原長維持
5	原形不明

図 1. ピロディン

図 2. ピロディン打ち込み試験

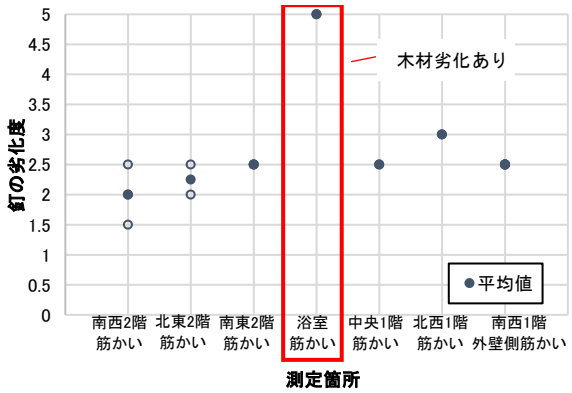


図 3. 鳥栖市木造住宅 調査結果

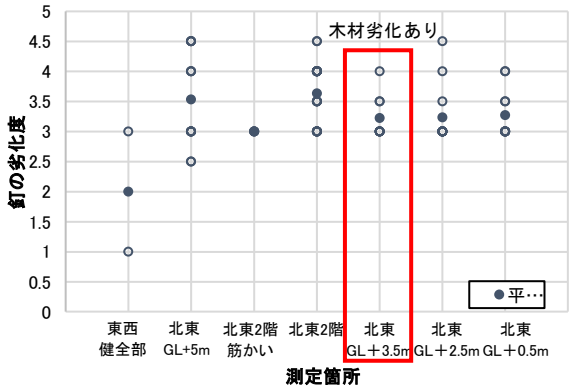


図 4. 豊橋市木造住宅 調査結果

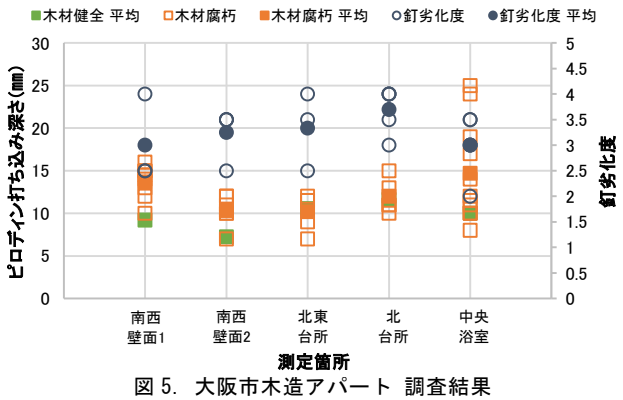


図 5. 大阪市木造アパート 調査結果

4．木材腐朽と木ねじ発錆が同時に起きた際の木ねじの構造性能実験

4.1 実験概要

本実験では、筋かい接合部や柱脚部を想定した木ねじを用いた単位接合部に木材の腐朽による生物劣化と接合具の発錆による劣化が同時に起きた際の接合部の構造性能を検証した。試験体仕様を表 3、試験体図を図 6 に示す。試験体を強制的に劣化させ、試験体の木材を気乾状態に戻してから一方向静的せん断試験を行った。その後、木材及び木ねじの劣化度合いを定量評価した。

4.2 実験方法

4.2.1 各劣化促進操作

各劣化促進条件を表 4 に示す。劣化促進は腐朽、発錆促進の順で行った。

腐朽促進操作は褐色腐朽菌であるオオウズラタケ(学名: *Fomitopsis palustris*)を用いた図 8 のような腐朽源ユニットを木ねじ部分にラップで固定し、表 4 の条件で静置した(図 8)。腐朽促進期間が終了後、試験体に付着した菌糸を取り除いた。

発錆促進操作は高温高湿状態を作り出すため水を張ったコンテナの中に試験体を静置し(図 9)、そのコンテナを 70℃の恒温器内に一定期間静置した(図 10)。

劣化促進を行う前に反力部分には防水テープで養生をした。これは、本実験では木ねじ部分のみを劣化させようとしたためである。また、発錆促進を行う前にねじ頭が極端に錆びないようにシーリング材を塗布した。これらは劣化促進期間終了後に取り外した。

4.2.2 一方向静的加力せん断試験

万能試験機を用い一方向静的加力の一面せん断試験を行った。セットアップ方法は図 11 に示す。加力は毎分 2mm の速度で制御し、最大荷重の 50%になった時点で終了した。

4.2.3 各劣化度合いの定量評価

せん断試験が終了した試験体から木材及び木ねじの劣化度合いを定量評価した。

木材劣化度合いは 3.1 と同様ピロディン打ち込み試験により評価した。また、試験体の腐朽部分と健全部分の 2 カ所からディスクを切り出し、目視観察や密度測定、全乾法による含水率測定も併せて行った。ピン打ち込み、ディスク取り出し位置を図 12 に示す。

木ねじ発錆度合いはピロディン打ち込み試験終了後に木ねじを取り出し、目視評価、除錆後の重量と各径の残存率を測定した。目視評価は 3.1 と同様に表 1 を参考とした。除錆方法は JASO M609-912[10]に従って行い、除錆後に木ねじの重量と各径(頭、首下、中間、先端)を測定した(図 13)。各径の測定はデジタル式ノギスを用い、それぞれの位置で直行 2 方向について測定し、平均値を算出した。

表 3. 試験体仕様

部材	材質	寸法 (mm)
主材	スギ製材乙種3級	60×60×200
側材	SUS304	60×140 (t=3.0)
木ねじ (YS-N45)	SWCH22A	ϕ = 6.0×45 (鍋ビス・先割れ)

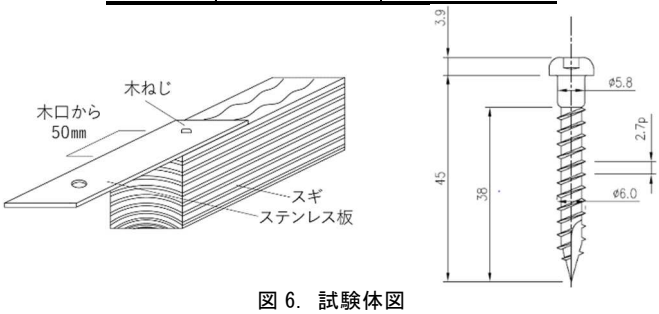


図 6. 試験体図

表 4. 各劣化促進条件

	腐朽促進	発錆促進
条件	温度：約25°C(室温) 場所：空調管理をした室内	温度、湿度：70°C、約100% 場所：恒温器内の水を張ったコンテナ
期間 n=10体	0、3、5、7、9週	0、1、3、7週

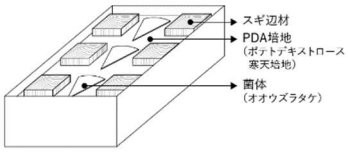


図 7. 腐朽源ユニット

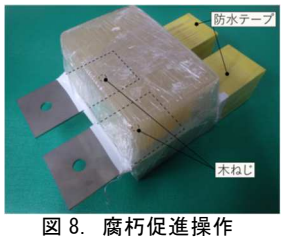


図 8. 腐朽促進操作

図 9. コンテナ内

図 10. 恒温器内

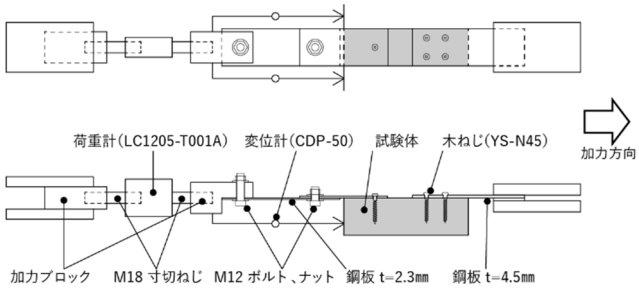


図 11. せん断試験 セットアップ方法

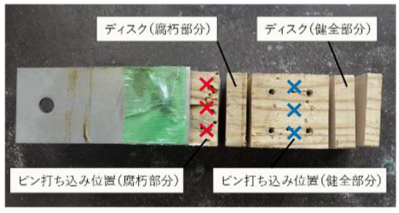


図 12. ピン打ち込み、ディスク位置

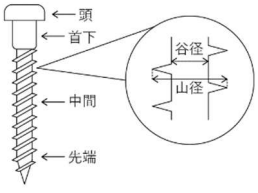


図 13. 木ねじ各径測定位置

4.3 実験結果

表 5 に各劣化度区分、表 6 に劣化度区分ごとの荷重変形曲線を示す。ここで、木材劣化度は試験体木ねじ周辺のピロディン打ち込み深さを井上ら[7]を参考に、木ねじ劣化度は重量残存率 90%、95%、100%で区分分けをした。また、せん断試験後の試験体破壊性状を各劣化度で図 14～17 に示す。

表 5. 各劣化区分

	劣化度	範囲
木材	劣化度 健全	ピロディン打ち込み深さ≦20mm
	劣化度 Ⅰ	20mm＜ピロディン打ち込み深さ≦25mm
	劣化度 Ⅱ	25mm＜ピロディン打ち込み深さ≦30mm
	劣化度 Ⅲ	30mm＜ピロディン打ち込み深さ
木ねじ	劣化度 A	100%≦重量残存率
	劣化度 B	95%≦重量残存率＜100%
	劣化度 C	90%≦重量残存率＜95%
	劣化度 D	80%≦重量残存率＜90%

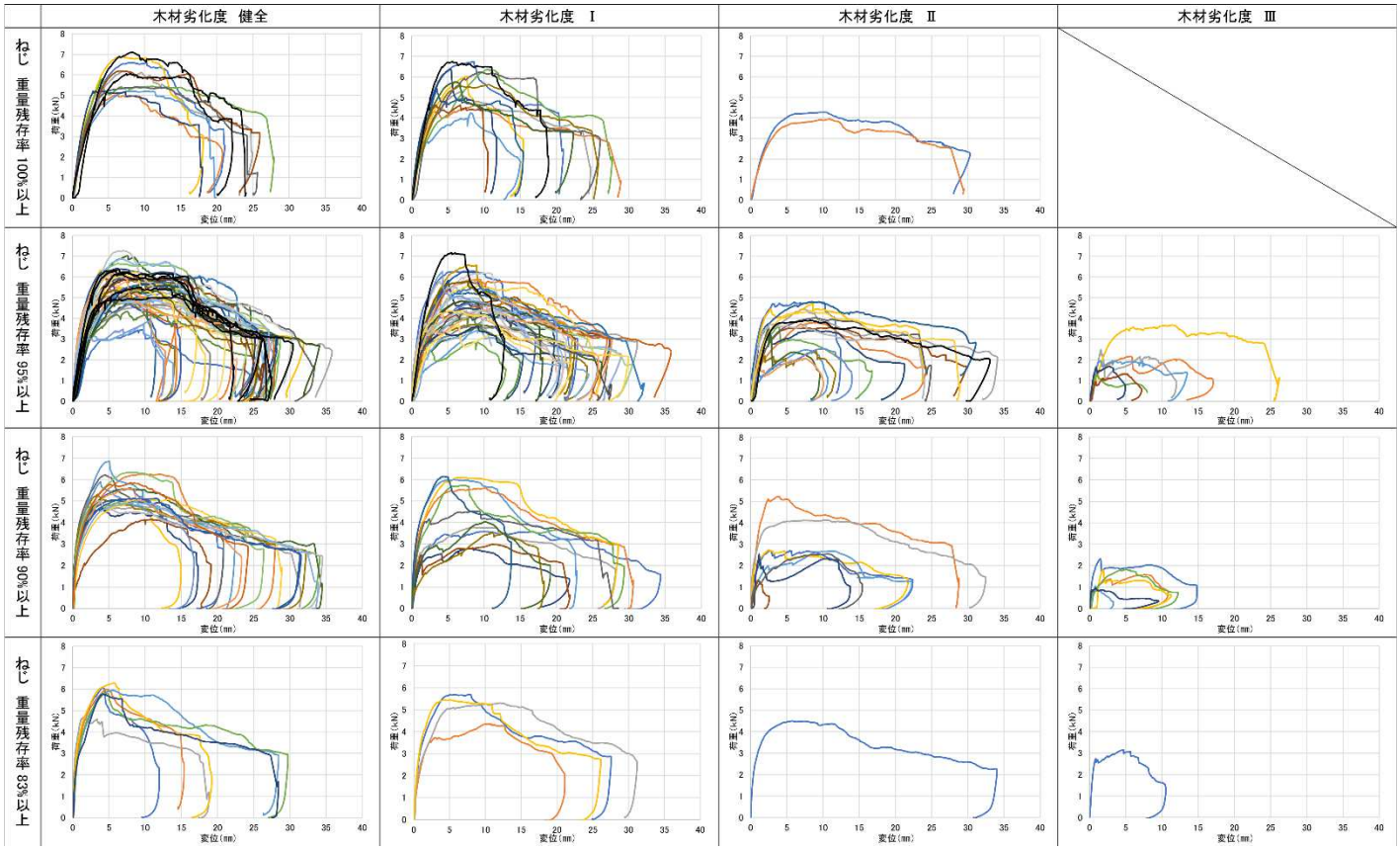
図 14. 木材健全・木ねじ A
せん断試験後 試験体断面

図 15. 木材 Ⅰ・木ねじ B
せん断試験後 試験体断面

図 16. 木材 Ⅱ・木ねじ C
せん断試験後 試験体断面

図 17. 木材 Ⅲ・木ねじ D
せん断試験後 試験体断面

表 6. 各劣化度の荷重変形曲線



4.4 考察

各劣化度合いと最大荷重の関係を図 18、初期剛性との関係を図 19 に示す。木材腐朽が最大せん断耐力の低下に大きく影響することが確認できたが、木ねじの錆による耐力の上昇は見られず木ねじ劣化度合いが大きくなるほど耐力が低下した。また、木ねじ劣化度合いが大きくなると初期剛性が高くなる傾向がみられた。

さらに、試験体木材の壊れ方に着目すると破壊性状は図 20 の 6 パターンに分類でき、最大荷重時における木材劣化度ごとの破壊形状の割合は図 21 となった。

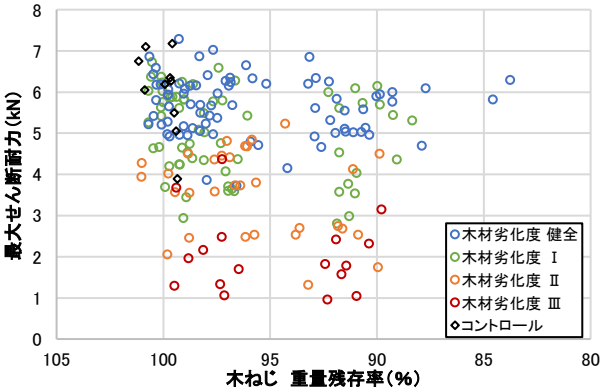


図 18. 木ねじ劣化度－最大荷重

以上より、最大耐力には木ねじの錆度合いより木材の腐朽度合いの方が大きく影響を与えることが分かった。また、木材劣化度Ⅱ、Ⅲ以上では木材腐朽部分がブロック状に押し出される破壊形状となる割合が高く、木ねじに抵抗する部分の木材が木ねじと併せて移動することで著しく耐力が低下したといえる。

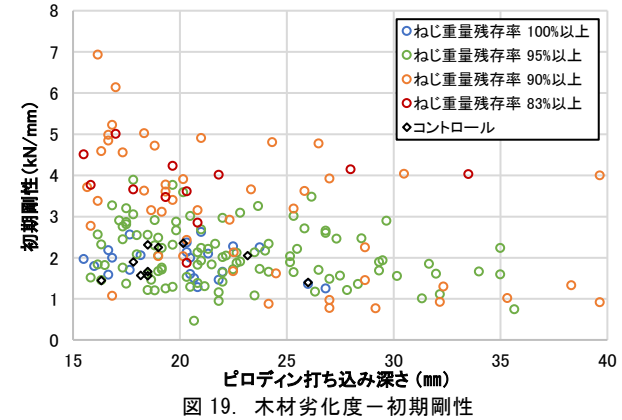


図 19. 木材劣化度－初期剛性

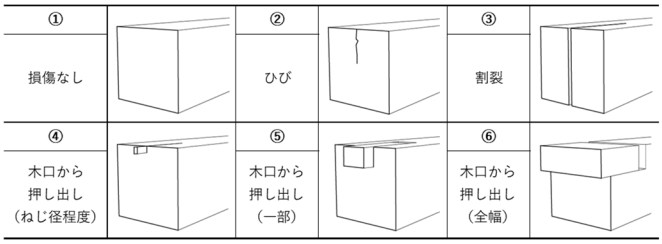


図 20. 試験体木材 破壊形状

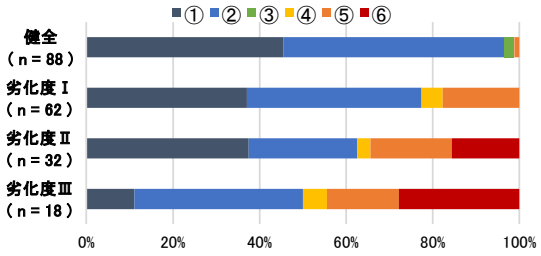


図 21. 木材劣化度ごと 最大荷重時の破壊形状 (n=200)

5. 予測

5.1 概要

既往研究[2)3)8)]や 3.4 から各劣化度合いが接合部の構造性能に与える影響のメカニズムを整理し、木材劣化度合いをピロディン打ち込み深さ、接合具劣化度合いを重量残存率で EYT 算定式(1)[11)]に反映させた。本予測では、劣化調査で測定が可能な劣化度を用いることで、実際の現場において劣化診断した結果から単位接合部の耐力を想定することを目標とした。

$$P_y = C \cdot F_e \cdot d \cdot l \quad \cdots (1)$$

ここで、$F_e = F_e'$、$d = d'$、$l = l'$を用いる。

5.2 木材腐朽度合い

まず、木材が腐朽することで図 22 のように健全な木材に打ち込まれている接合部の有効長さlが短くなると考えた。これを仮想有効長さl'とした。

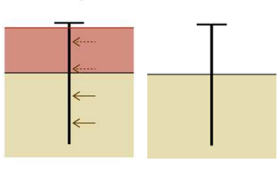


図 22. 木材劣化メカニズム

$$l' = l - (Dp_d - Dp_0) \quad \cdots (2)$$

ここで、l：元の接合具有効長さ(mm)

Dp_d：腐朽部分のピロディン打ち込み深さ(mm)

Dp_0：健全部分のピロディン打ち込み深さ(mm) 15mm

さらに、3.4 のように腐朽が進行すると劣化が大きい部分は接合具を支える力がなくなると考え、その部分の木材は無いものとした（図 22）。そこで、実際に加わる荷重は式(2)としたときの位置での荷重と異なり、低減することが必要である。これを石山ら[3)]を参考とし、接合具のモーメント 0 点を算出することで、その分低減した。低減係数k_{m0}を次式に示す。

$$k_{m0} = \frac{l_{m1}}{h + l_{m1}} \quad \cdots (3)$$

$$l_{m1} = \frac{1}{\beta}\tan^{-1}\left(\frac{\beta h}{1+\beta h} + \pi\right) \quad \cdots (4)$$

$$\beta = [k_h \cdot B/(4EI)]^{1/4} \quad \cdots (5)$$

ここで、l_m：地中部曲げモーメント第 1 ゼロ点

h：$(D_{pd} - D_{p0}) + 1.5$

k_h：水平地盤反力係数　ここでは、$58 \times (D_{p0}/D_{pd})$

B：杭径　ここでは、接合具径d'

EI：杭体の曲げ剛性　ここでは、$205000 \times (\pi d'^4/64)$

また、本予測では健全部分のみが接合具を支持していると仮定したので、木材支圧強度には河野ら[12)]の実験から得られた式に健全部のピロディン打ち込み深さを代入することで算出した。

$$Fe = 307.89 \times Dp_0^{-0.725} \quad \cdots (6)$$

ここで、Fe：支圧強度 (N/mm^2)

5.3 錆度合い

接合具の錆が進行すると径が小さくなり、接合具の重量残存率との相関もあることが本実験から確認できている(図 23)。よって、接合具重量残存率から錆が進行した接合具径d'を算出した。

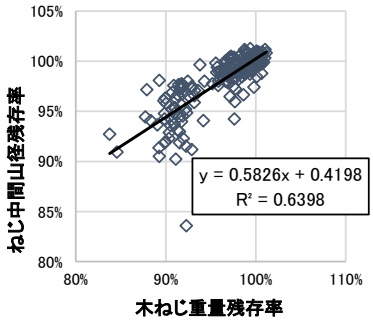


図 23. 重量残存率－ねじ径

$$d' = (0.5826 \times r_w + 0.41982) \times d \quad \cdots (7)$$

ここで、r_w：接合具の重量残存率 (%)

d：接合具の呼び径 (mm)、ただし木ねじは 0.75 倍[11)]

さらに、石山らの実験から錆による引抜耐力の上昇が確認できている(図 24)。そこで、本予測でも接合部の軸部分の錆により引抜力が上昇すると考えた(図 25)。したがって、EYT 算定式(1)に次式のような引抜耐力Nを考慮することとした。

$$N = P_r + (P_d \times 0.75)\cos\theta \quad \cdots (8)$$

ここで、P_r：錆による引抜抵抗力(N)

P_d：終局引抜耐力(N)

$$P_r = P_{max}\cos\theta \cdot \mu \quad \cdots (9)$$

ただし、摩擦係数 μ は石山らの実験結果から接合具の重量残存率ごとで以下のように算出した。

（95%＜接合具の重量残存率≦100%の場合）

$$\mu = (-48 \times r_w + 48.6) \times (A_a/A_{CN65}) \quad \cdots (10)$$

（83%＜接合具の重量残存率≦95%の場合）

$$\mu = (-4.17 \times r_w + 6.96) \times (A_a/A_{CN65}) \quad \cdots (11)$$

（接合具の重量残存率≦83%の場合）

$$\mu = (4.17 \times r_w + 0.04) \times (A_a/A_{CN65}) \quad \cdots (12)$$

ここで、 A_a：接合具の軸部面積 (mm^2)（図 25）

A_{CN65}：CN65 釘の軸部面積 (mm^2)

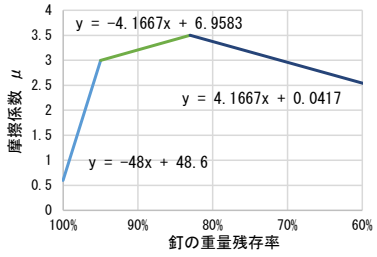


図 24. 摩擦係数－引抜耐力（CN65 釘）[3)]

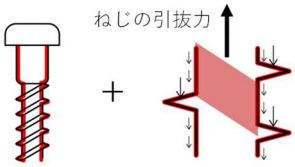


図 25. 木ねじ発錆メカニズム

また、終局引抜耐力 P_d は木質構造設計規準 [11)]に示される式を用いた。

（接合具が釘の場合）

$$P_d = 44.1\gamma_0^{2.5} \cdot d' \cdot l' \quad \cdots (13)$$

（接合具が木ねじの場合）

$$P_d = 38.1\gamma_0^{1.5} \cdot d' \cdot l' \quad \cdots (14)$$

ここで、γ_0：木材の基準比重 ここでは、0.32

5.4 実験値と予測値の比較

5.1-3 で算出した各値を用い最大せん断耐力は次式で表される。

$$P_{max} = N\sin\theta + 1.5 \times k_{m0} \cdot P_y \cos\theta \quad \cdots (15)$$

さらに、式(8)を式(15)に代入すると次式を得る。

$$P_{max} = \frac{\cos\theta}{1 - \mu\cos\theta\sin\theta}\left(P_d \times 0.75 + 1.5 \times k_{m0} \times P_y\right) \quad \cdots (16)$$

ここで、θ：最大せん断耐力時の接合具変形角度

3 章での実験結果である最大せん断耐力と実験で得たピロディン打ち込み深さ、木ねじの重量残存率から式(16)より算出した予測値を比較したものを図 26-27 に示す。木材劣化度ごとに実験結果と予測値を比較すると、ばらつきが大きいものの概ね一致した。特に、ピロディン打ち込み深さ約 28mm 以上の実験値と予測値はよく再現できた。しかし、ピロディン打ち込み深さが 28mm より小さい範囲では実験値に比べ予測値は小さい値となった。これは、本予測では腐朽した部分は無いものと仮定したが、実際の腐朽初期段階ではその部分に接合具の動きに抵抗する力が残っているため実験値よりも小さい予測値が算出されたと考えられる。

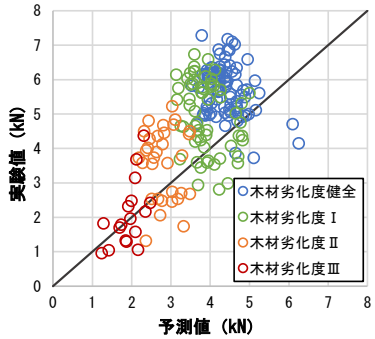


図 26. 予測値－実験値

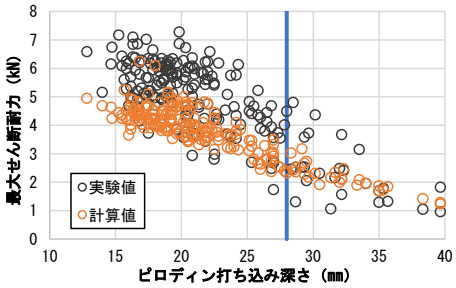


図 27. ピロディン打ち込み深さ－最大せん断耐力

6．まとめ

本研究では、筋かい金物や柱脚金物を用いた接合部を想定した木ねじ単位接合部のせん断試験を行い、以下のような知見を得た。

1) 木ねじ発錆に比べ、木材腐朽による試験体木材の破壊性状が最大せん断耐力に大きく影響を与えた。

また、既往研究 [3)4)10)]や本研究での実験から各劣化が接合部性能に与える影響のメカニズムを考え、EYT 算定式を用いて予測することで以下のような知見を得た。

2) 木材腐朽が進行すると健全な木材に打ち込まれている接合具有効長さが短くなるとした。

3) 接合具発錆が進行すると接合具径が小さくなる。また錆の影響で上昇する引抜耐力を加えた。

4) 2)3)から算出した最大せん断耐力の予測値は実験結果と概ね一致し、各劣化度合いを反映できた。

今後は更に定量的な劣化調査データを蓄積する必要がある。また、異なる樹種や接合具においても本予測方法での耐力予測が可能であるかの確認をし、建物全体での解析へ本予測値を用いて建物全体での耐力低下の予測を行うべきである。

参考文献

1) 一般財団法人日本建築防災協会，国土交通大臣指定耐震改修支援センター：2012 年改訂版 木造住宅の耐震診断と補強方法 例題編・資料編，pp.199-209，2019.

2) 和田ら他 1 名：腐朽材に打ち込まれた釘の構造性能実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.507-508，2019.

3) 石山ら他 1 名：釘接合部の劣化時せん断性能に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.646，pp.2281-2289，2009.

4) 今村ら他 5 名：30 年経過した木造住宅における鉄釘の劣化調査，林業試験場研究報告，No.332，pp.95-104，1983.

5) 秦ら他 3 名：長期耐用された地域型木造住宅の耐震診断におけるピロディン閾値，木材保存，Vol.30，No.1，pp.6-14，2004.

6) 澤田圭：腐朽が木質構造機械的接合部の接合性能に与える影響，木材保存，Vol.41，No.1，pp.2-7，2015.

7) 井上涼，森拓郎，田中圭，佐藤宙：腐朽深さを考慮した接合具の一面せん断耐力の推定法の提案，木材保存学会，第 36 回年次大会 研究発表論文集，pp.70-75，2020.

8) 松岡ら他 1 名：腐食したねじの構造性能実験，中部大学卒業論文，2016.

9) 高梨ら他 1 名：釘引抜き抵抗力に対する木材腐朽とさびの影響,日本建築学会大会講演梗概集（東海），pp.607-608，2012.

10) JASO M609-91：自動車規格 自動車用材料腐食試験方法

11) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計－，丸善、2006.

12) 河野ら他 5 名：生物劣化を受けた国産針葉樹の残存強度性能（その 3）腐朽したスギ材に打ち込まれた釘の一面せん断耐力の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.387-388，2004.