



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Research on Residual Strength Performance of Deteriorated Existing Timber Housing and New Seismic Strengthening Methods [an abstract of entire text]
Author(s)	上田, 麟太郎
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第14822号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85568
Type	doctoral thesis
File Information	Ueda_Rintaro_summary.pdf



学位論文内容の要約

博士の専攻分野の名称: 博士(農学)

氏名 上田 麟太郎

学位論文題名

Research on Residual Strength Performance of Deteriorated Existing Timber Housing and New
Seismic Strengthening Methods

(既存木造住宅の劣化時残存性能と耐震補強方法に関する研究)

第1章 研究の背景

近年、持続可能な開発目標(SDGs)の達成や持続可能社会の形成という観点から、炭素固定効果につながる木質構造物の長寿命化はこれまでにない重要性が高まっている。木造住宅をはじめとする木質構造物には使用可能期間すべてにわたる安全性の確保が必要であるが、使用期間が長期になるにつれ、木材腐朽等の劣化が生じる可能性や、大規模な地震害等にさらされるおそれが高まる。

木質構造物の強度性能は接合部の性能に大きく依存しており、木質構造物の接合部では特に、ビスや釘などの接合具が広く利用されている。したがって腐朽劣化した木質構造物の安全性の評価には、こういった接合部に腐朽が生じた場合の変形挙動と強度低下に関する検討が必要である。

また数多くの地震被害の経験から、木造住宅の耐震基準は度々見直され、常に耐震性能の向上が図られてきた。しかし、未だ必要な耐震性能が不足した木造住宅は特に築年数の古いものを中心として多く残っており、早急な耐震補強の必要性が指摘されている。木質構造物やその接合部の耐震補強には鋼板・合板を用いる例がみられるが、耐久性・施工性でのメリットから炭素繊維強化プラスチック(CFRP)素材の適用も今後考えられる。高強度の CFRP は接合部を効率的に補強できる可能性がある。また、CFRP を用いた鉄筋コンクリート構造物の耐震補強方法は広く普及しており、木質構造物の機械的接合部の補強技術への応用が期待できる。

本研究では既存木造住宅の長寿命化を目的として、腐朽が生じた木質構造物の接合部の変形挙動や残存性能の評価、および CFRP を用いた、木造住宅に利用可能な新たな補強方法の提案を行った。

第2章 木材腐朽がビス接合部の残存性能と変形挙動に及ぼす影響

【背景と目的】

木造住宅において木材腐朽が生じた場合、腐朽劣化した部材には補強、または部分的な交換が行われる。しかし、部材の交換には構造の分解が必要であり、技術面・費用面に難点があることから、補強が選ばれることも多い。木質構造物の補強には、補強金物がビス接合により用いられる。しかし腐朽が生じた部材におけるビス接合部の強度性能については、研究例が限られており知見の蓄積が少ない。そこで第2章では、木材腐朽がビス接合部の残存性能と変形挙動に及ぼす影響について検討を行った。

【方法】

試験体にはトドマツ(*Abies sachalinensis*)を用いた。試験体寸法は幅 60×厚さ 60×長さ 300 mm であり、平均密度は 442 kg/m³であった。試験体数はコントロール 9 体と腐朽試験体 12 体である。なおコントロールのうち 5 体は材幅が 45 mm であったが、試験結果上で材幅 60 mm のものと差は認められなかった。側材には厚さ 6 mm の鋼板を用いた。鋼板にはビスを通す 6.1 mm 径の穴を設けた。ビスには、TBA-65D ビス(ねじ外径 6.0 mm, 内径 4.0 mm, 全長 69 mm, うちねじ長さ 55 mm, 株タナカ製)を用いた。TBA-65D ビスの平均曲げ降伏強度は 1117 N/mm²である[1]。腐朽試験体には、腐朽源ユニット法[2]を用いて褐色腐朽菌オオウズラタケ(*Fomitopsis palustris*, FFPRI0507 株)による腐朽処理を行った。腐朽処理は温度 28°C, 相対湿度 75%環境下で 22 週間実施した。試験体は腐朽処理期間が終了後、室温環境下で 2 週間以上、気乾状態になるまで乾燥した。その後、加力試験直前に鋼板をビスで試験体に留め付けた。留め付けの際、試験体に先穴は設けず、また摩擦が発生しないよう試験体・鋼板の間にわずかな隙間を残した。ビス接合部の端距離は 80 mm とした。加力試験は油圧試験機により一方向繰り返し加力方式で実施し、設定変位の 1/2, 1, 2, 4 倍まで 1 回ずつ加力した後、変位が 30 mm に達するかビスが破断するまで単調加力を実施した。加力試験後、試験体の腐朽性状の評価として、ビス留め付け部の近傍で Pilodyn 6J (Proceq SA, スイス)により Pilodyn 打ち込み深さ(d_p)を求め、留め付け位置で腐朽深さを測定した。

【結果と考察】

ビス接合部の降伏モードはビスに形成された塑性ヒンジの数から、Johansen の降伏理論[3]より塑性ヒンジの数が 1 つであるモード III と 2 つであるモード IV に分けられた。コントロール 9 体中 2 体、腐朽試験体 12 体中 9 体がモード III を示し、残りがモード IV を示した。接合部に現れる降伏モードに腐朽が影響したと考えられる。荷重-変位曲線からビス接合部の強度性能を最大耐力 P_{max} の 10, 40, 90%点による完全弾塑性モデル化[4, 5]により評価し、初期剛性 K_s と降伏耐力 P_y を求めた。 P_y , P_{max} はコントロールに対し腐朽試験体で有意に低かった($p < 0.01$)。 K_s についてはコントロール・腐朽試験体間で有意差を認められず($p > 0.05$)、釘、ビス接合部で腐朽による初期剛

性への影響がみられなかった既往研究の結果[1, 6]と一致した。低下率は P_y が最も大きく、次いで P_{max} , K_s の順となった。 d_p の値と K_s , P_y , P_{max} との間に有意な相関は認められなかった($p>0.05$)。測定された d_p の範囲が狭く、また最大で測定可能な値(40 mm)がビスのねじ長さを下回っていたためと考えられる。腐朽深さは K_s との間に有意な負の相関を示した($p<0.01$)が、 P_y , P_{max} とは相関関係が認められなかった($p>0.05$)。いっぽう腐朽深さと部材の健全部の密度を説明変数とする K_s , P_y , P_{max} の重回帰分析結果はいずれも有意であり($p<0.05$)、健全部の性状がビス接合部の性能を決定したと示唆された。ビス 7 本を用いた腐朽ビス接合部[1]におけるビス 1 本あたりの K_s , P_y , P_{max} の値は本研究との間に有意差を認められなかった($p>0.05$)。したがって腐朽が生じたビス接合部について、1 本のビスを用いた加力試験の結果から複数本のビスを用いた場合の強度性能を推定できることが示唆された。

第 3 章 初期腐朽を生じた釘接合部の残存性能と変形挙動

【背景と目的】

木材腐朽に関しては、原因となる腐朽菌や腐朽のメカニズムなどに関して研究の蓄積があり、腐朽により木材の強度性能が大きく低下することが広く知られている。しかし長きに渡り木材腐朽はその防除に焦点が置かれ、接合部の強度性能への木材腐朽の影響については、あまり研究が進んでいない。木材腐朽が生じた部材への釘やビスを使用した補強は広く利用されており、したがって、木材腐朽がそういった接合部の性能に及ぼす影響に関して研究を蓄積する必要がある。そこで第 3 章では、木材腐朽が釘接合部の残存性能と変形挙動に及ぼす影響について検討を行った。

【方法】

試験体にはトドマツ(*A.sachalinensis*)を用いた。試験体寸法は幅 45×厚さ 60×長さ 300 mm であり、平均密度は 378 kg/m³であった。試験体数はコントロール 5 体と腐朽試験体 20 体である。側材には厚さ 6 mm の鋼板を用いた。鋼板には釘を通す 4.7 mm 径の穴を設けた。釘には、N125 釘(径 4.6 mm)を首下長さ 65 mm に切断することで第 2 章の TBA-65D ビスと有効径・有効長さをそろえ、先を尖らせたものを用いた。腐朽試験体には、腐朽源ユニット法[2]を用いて *F.palustris* (FFPRI0507 株)による腐朽処理を行った。腐朽処理は温度 28°C、相対湿度 75%環境下で 20 週間実施した。試験体は腐朽処理期間が終了後、室温環境下で 2 週間以上、気乾状態になるまで乾燥した。その後、加力試験直前に鋼板を釘で試験体に留め付けた。留め付けの際、試験体に先穴は設けず、また摩擦が発生しないよう試験体・鋼板の間にわずかな隙間を残した。釘接合部の端距離は 80 mm とした。加力試験は油圧試験機により一方向繰り返し加力方式で実施し、設定変位の 1,2,4,8 倍まで 1 回ずつ加力した後、変位が 30 mm に達するか荷重が最大荷重の 80%に低下するまで単調加力を実施した。加力試験後、試験体の腐朽性状の評価として、釘留め付け部の近傍で Pilodyn 6J (Proceq SA, スイス)により d_p を求め、留め付け位置で腐朽深さ(d_d)を測定し

た。

【結果と考察】

腐朽による試験体の褐変は顕著でなく、ほとんどの試験体は初期腐朽の状態にあったと考えられた。釘接合部の降伏モードはコントロール・腐朽試験体ともすべてモード IV であった。釘接合部の強度性能を比較すると、 P_{max} はコントロールに対し腐朽試験体で有意に低かった($p<0.01$)が、 K_s 、 P_y についてはコントロール・腐朽試験体間で有意差を認められなかった($p>0.05$)。したがって腐朽の程度が軽微であっても、釘接合部の強度性能に影響が生じている場合があることが示唆された。 d_p と P_y 、 P_{max} は有意な負の相関を示した($p<0.01$)が、値のばらつきが大きく、回帰式は決定的でない恐れがある。いっぽう d_d と K_s 、 P_y 、 P_{max} との間にはいずれも、有意な相関は認められなかった($p>0.05$)。第 2 章のビス接合部と結果を比較したところ、コントロール・腐朽試験体とも K_s は釘接合部のほうが高く、 P_y 、 P_{max} は釘接合部のほうが低かった。ビス接合部では P_y にコントロール・腐朽試験体間で有意差が認められた($p<0.01$)のに対し釘接合部では認められなかった($p>0.05$)が、これは腐朽試験体で優勢となった降伏モードがビス接合部(モード III)と釘接合部(モード IV)で違っていたためと考えられた。

第 4 章 加力方向の違いが腐朽釘接合部の性能劣化と破壊形態に及ぼす影響

【背景と目的】

木材には繊維直交方向に比べ繊維方向のほうが強度が高いという強度異方性があり、釘接合部の強度性能も繊維直交方向に比べ繊維方向で高いことが報告されている[7]。いっぽう木材腐朽菌には、木材の繊維直交方向に比べて繊維方向で菌糸成長が早い[8]という特徴があることが知られている。そのため、腐朽が生じた釘接合部では、加力方向と木材の繊維方向との関係が腐朽による強度低下の傾向に影響を与える可能性がある。腐朽による釘接合部の繊維方向の強度低下については検討例が多くあるが、繊維直交方向では少ない。しかし木造住宅で汎用される合板耐力壁では、水平力を受けた場合に部材の繊維方向にも繊維直交方向にも釘接合部が荷重を受ける。したがって繊維方向・繊維直交方向の両方について、部材に腐朽が生じた場合の強度低下に関する知見の蓄積が必要である。そこで第 4 章では、合板耐力壁の部材の腐朽を想定し、木材腐朽が部材の繊維方向・繊維直交方向で釘接合部の残存性能と変形挙動に及ぼす影響について検討を行った。

【方法】

試験体にはトドマツ(*A.sachalinensis*)を用いた。試験体寸法は幅 105×厚さ 105×長さ 180 mm であり、平均密度は 389 kg/m³であった。試験体数はコントロール 6 体と腐朽試験体 12 体である。側材には厚さ 12 mm のカラマツ合板(平均密度 707 kg/m³)を用いた。釘には、CN50 釘(径 2.87 mm, 首下長さ 50 mm)の塗膜をアセトンで除去したものをを用いた。腐朽試験体には、腐朽源ユニット法[2]を用いて *F.palustris* (FFPRI0507 株)による腐朽処理を行った。腐朽処理は温度 28℃, 相対

湿度 75%環境下で 20 週間実施した。試験体は腐朽処理期間が終了後、室温環境下で 2 週間以上、気乾状態になるまで乾燥した。その後、加力試験直前に合板を釘で試験体に留め付けた。留め付けの際、試験体に先穴は設けず、また摩擦が発生しないよう試験体・合板の間にわずかな隙間を残した。釘接合部の端距離は繊維方向については 80 mm、繊維直交方向については 26 mm とした。加力試験は油圧試験機により一方向繰り返し加力方式で実施し、設定変位の 1,2,4,8,12 倍まで 1 回ずつ加力した後、変位が 30 mm に達するか荷重が最大荷重の 50%に低下するまで単調加力を実施した。加力試験後、試験体の腐朽性状の評価として、釘留め付け部の近傍で Pilodyn 6J (Proceq SA, スイス)により d_p を求め、留め付け位置で d_d を測定した。

【結果と考察】

繊維方向加力では釘接合部の破壊はすべて釘の引き抜きにより生じ、コントロール・腐朽試験体間で試験体の損傷の様子に差はみられなかった。降伏モードはコントロールすべてと腐朽試験体 12 体中 6 体がモード IV、残る腐朽試験体 6 体がモード III であった。繊維直交方向加力ではコントロールはすべて釘の引き抜きにより破壊したが、腐朽試験体では 12 体中 7 体で部材の割裂破壊が生じた。降伏モードはコントロールすべてと腐朽試験体 12 体中 10 体がモード IV、残る腐朽試験体 2 体がモード III であった。釘接合部の強度性能を比較すると、繊維方向・繊維直交方向とも、 K_s , P_y , P_{max} のすべてにおいてコントロールに対し腐朽試験体で有意に低かった ($p < 0.05$)。コントロールに対する腐朽試験体での強度性能の低下率は繊維方向・繊維直交方向とも K_s が最も大きく、 P_y , P_{max} の順に小さくなった。 K_s の低下率は繊維方向のほうが繊維直交方向に対して約 1 割高くなったが、 P_y , P_{max} の低下率は繊維方向・繊維直交方向の間で差がみられなかった。このことから P_y , P_{max} については、部材の繊維方向での腐朽による接合部の性能低下に関する既往研究の知見をもとに、繊維直交方向での低下に関して推定が可能であることが示唆された。

第 5 章 Pilodyn によるピン貫入の高速性が腐朽診断結果に及ぼす影響

【背景と目的】

木造住宅の腐朽劣化やそれに対する残存性能の評価には、簡便に部材の腐朽の程度を評価・診断可能な手法が必要であり、非破壊ないし準非破壊的手法が求められている。準非破壊的な劣化診断方法として迅速かつ経済的に実施可能[9]なピン貫入試験が広く利用されており、特に Pilodyn の使用が最も汎用的である。腐朽劣化した接合部の安全性を Pilodyn により評価する試みも多くなされている。しかし Pilodyn の測定値は大きなばらつきを伴う場合もあり、接合部の残存性能の評価などを目的とした精密な劣化性状の診断に向けては、改良の余地が残されている。バネ力を利用する Pilodyn のピン貫入の高速性が測定値のばらつきにつながることを示唆されており[10]、貫入の低速化により精度を向上できる可能性がある。そこで第 5 章では油圧試験機を利用して低速でピン貫入を行い、腐朽性状の評価結果を Pilodyn の場合と比較した。

【方法】

試験体は第3章, 第4章で釘接合部試験体として利用したトドマツ(*A.sachalinensis*)材を利用した。試験体の平均密度は 373 kg/m^3 , 寸法は最小で幅 $20 \times$ 厚さ $100 \times$ 長さ 60 mm であった。試験体数はコントロール 12 体, 腐朽試験体 32 体である。腐朽試験体 32 体は, 第3章, 第4章に記述したとおり, 腐朽源ユニット法[2]を用いて *F.palustris* (FFPRI0507 株)による腐朽処理を 20 週間行ったものである。まず, Pilodyn 6J (Proceq SA, スイス)を使用して試験体の d_p を測定した。さらに静的試験として, Pilodyn 用 2.5 mm 径鋼製ピンを油圧試験機に取り付け, 約 0.3 mm/s の速度で試験体に貫入した。静的試験は貫入深さが 20 mm に達するまで行い, 荷重-変位曲線から貫入時の最大荷重と, 消費エネルギーが $0.5, 1, 2, 4, 6 \text{ J}$ に達した際の貫入深さ(それぞれ $d_{0.5J}, d_{1J}, d_{2J}, d_{4J}, d_{6J}$)を求めた。その後各試験体から小試験体を切り出し, 絶乾法により密度を求めた。

【結果と考察】

d_p の値は大きなばらつきを示し, 試験体の密度との間に特定の傾向は認められなかった。静的試験において荷重-変位曲線は複雑な変動を示したが, 消費エネルギーと変位の関係曲線は線形的であり, 変動が認められなかった。貫入時の最大荷重は大きなばらつきを示し, 試験体の密度との間に特定の傾向は認められなかった。いっぽう $d_{0.5J}, d_{1J}, d_{2J}, d_{4J}, d_{6J}$ はいずれも試験体の密度との間に有意な負の相関を示し($p < 0.005$), 消費エネルギーが増加するにつれ決定係数が高くなる傾向にあった。このことから, 静的にピンを貫入する方法により, 特定の消費エネルギーに相当する貫入深さから木材の密度を推定できることが示唆された。また, 静的貫入による密度推定の精度は Pilodyn に比べて高く, したがって d_p のばらつきが Pilodyn のピン貫入の高速性に由来する可能性があると考えられた。

第6章 CFRP プレートをビス・接着剤併用で施工する補強方法の提案

【背景と目的】

既存建築物の補強への CFRP の利用がますます拡大している。CFRP は補強対象となる構造物に外側から接着により施工して補強に用いることが多く, 特にコンクリート構造物に対しては, CFRP シートを接着施工する方法に豊富な知見があり, 実績も多い。木材と CFRP の接着に関しても研究がなされており, 複数の研究で接着挙動について解析モデルが提案されている。木材への CFRP 施工に関してはビスなど接合具の使用も提案されているが, 検討例に限られており知見が不足している。また施工方法を問わず, CFRP を木質構造接合部の補強に利用した検討例はほとんどなく, 補強接合部の挙動や性能は明らかでない。木造住宅では地震力や風圧力などの水平力への抵抗に柱-土台接合部での柱の引き抜き防止が重要であるが, 既存木造住宅では, CFRP の薄さを生かすことで効率的にその補強を実施できる可能性がある。いっぽう現場接着を認めていない日本の建築基準下では, 接着以外の施工方法の利用が必要である。そこで第6章では, プレート状に成型した CFRP をビスと接着剤の併用により柱-土台接合部に施工する補強方法を

提案し、その効果を検討した。

【方法】

試験体は 105×105 mm 断面のスギ(*Cryptomeria japonica*)正角材から作製し、柱材を長さ 645 mm (うちほぞ長さ 45 mm)、土台材を長さ 1000 mm として製作した。引き抜きの際にほぞ組みで摩擦が発生しないよう、柱材のほぞに対して土台材のほぞ穴を大きく製作した。試験体の平均密度は 373 kg/m³であった。CFRP プレートは寸法 105×210 mm で 20 個のビス穴を千鳥状に配置した。ビスのめりこみに起因する CFRP プレートの破断を防止するため、プレートは構成する炭素繊維を平織(二方向配向)した構造とした。プレートの厚さは 0.75 mm と 0.50 mm の 2 種類を用意し、接着面は接着性向上[11, 12]のためピールプライ仕様(P 仕様)とした。0.50 mm 厚のプレートについては、接着面をピールプライとせず、ペーパー研磨とした仕様(S 仕様)も用意した。接着剤は変成シリコン接着剤 2 種類(SI1, SI2)とエポキシ接着剤 1 種類(EP)を供試した。引張せん断試験により求めた接着剤の接着せん断強度は SI1, SI2, EP がそれぞれ 0.76, 5.62, 18.9 MPa であった。ビスには CW-41RF ビス(ねじ外径 4.0 mm, 内径 2.65 mm, 全長 41 mm, うちねじ長さ 31 mm, ㈱シネジック製)を使用した。接着剤を CFRP プレートと試験体の両面に塗布したあと、プレートを試験体に貼り付けて 72 時間以上圧縮し、その後ビス 20 本を留め付けた。加力試験は油圧試験機により一方向繰り返し加力方式で実施し、設定変位の 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 倍まで 1 回ずつ加力した後、荷重が最大荷重の 50%に低下するまで単調加力を実施した。試験体は CFRP プレートについて 3 種類、接着について 4 種類(接着剤 3 種類+接着なし)の 12 仕様となり、各仕様で 3 体ずつを供試した。

【結果と考察】

補強接合部は加力にしたがってまず接着が剥離し、続いて CFRP プレートへのビスのめりこみが進む過程に移行するという変形過程をとった。補強接合部はその後、プレートの表面からのビス頭の引き抜き(パンチングアウト)またはプレート端部からのビスの離脱が進んで次第に荷重が低下し、降伏に至った。引張加力とビスのめりこみに起因するプレートの破断は発生しなかった。補強接合部の破壊の形態はプレートからのビスのパンチングアウトと離脱によるもの(モード P, 13 体)、モード P に土台材の割裂を伴ったもの(モード S, 12 体)、また引張加力後の戻し加力時にプレートが座屈して折損したもの(モード B, 11 体)の 3 種類に分けられた。モード S は 0.75 mm 厚プレートの試験体で多く見られ(12 体中 10 体)、0.50 mm 厚プレートの試験体での発生は 24 体中 2 体にとどまった。このように 0.75 mm 厚プレートの試験体ではビスの曲げ変形や部材の損傷が多く見られたが、0.50 mm 厚プレートの試験体では 24 体中 22 体でプレートのみが損傷し、ビスや部材には変形・損傷がみられなかった。0.75 mm 厚プレートではプレートに対するビスのめりこみ強度が、スギ材に対するビスのめり込み強度を上回っていたと考えられる。モード B は 0.50 mm 厚プレートの試験体でのみ発生したことから、厚く剛性の高いプレートを使用することで同様の損傷を防止できると考えられた。SI1 による接着の剥離に関してはプレートの仕様を問わず木破率は

0%であり、接着強度が不足していたと考えられた。SI2, EP では P 仕様のプレートを使用した試験体は S 仕様のものに対し高い木破率を示し、剥離は土台材の側でのみ見られた。これにより SI2, EP ではプレートが部材に十分に接着されていたこと、また、P 仕様のプレートで良好な接着性が得られたことが確認された。SI2, EP を使用した試験体は、接着しなかった試験体に比べ高い K_s を示し、接着剤の使用により補強接合部の初期剛性の向上が見込めると考えられた。

第 7 章 二方向繊維強化 CFRP プレートをビスで施工する補強方法の検討

【背景と目的】

CFRP を利用する既存建築物の補強では、CFRP は接着により施工されることが多い。コンクリート構造物については既に、CFRP を接着して施工する補強方法に関して施工指針[13]が定められており、実績も増えている。CFRP 補強に関する研究も、接着施工に注目したものが多くある。しかし実用上、接着剤は耐久性や施工精度の懸念、建築法規上の問題から利用を制限される場合があり、接着以外の CFRP 施工方法の開発が求められている。その一つとして、接合具の利用が考えられる。木質構造物ではビスが広く利用されており、接着剤に比べ施工・取り外しが容易で、作業による施工精度の差も小さい。前章では、炭素繊維を平織(二方向配向)した CFRP プレートでビスのめりこみに起因するプレートの破断は発生せず、ビス施工が可能であることを示した。CFRP プレートのビス施工にはこのように炭素繊維を二方向に配向した構造(二方向繊維強化)が必要と考えられるが、二方向繊維強化プレートの設計には炭素繊維の平織のほかに、綾織や、炭素繊維の方向を一方向に揃えたレイヤーの直交積層も選択可能である。そこで第 7 章では、CFRP プレートをビスにより柱-土台接合部に施工する補強方法について、異なる二方向繊維強化構造をもつプレートを供試して効果を比較・検討した。

【方法】

試験体は 105×105 mm 断面のスギ(*Cryptomeria japonica*)正角材から作製し、柱材を長さ 645 mm (うちほぞ長さ 45 mm)、土台材を長さ 1000 mm として製作した。引き抜きの際にほぞ組みで摩擦が発生しないよう、柱材のほぞに対して土台材のほぞ穴を大きく製作した。試験体の平均密度は 402 kg/m³であった。CFRP プレートは寸法 100×200 mm で 26 個のビス穴を千鳥状に配置した。CFRP プレートは炭素繊維を平織した構造のプレート(CP)に加え、綾織した構造のプレート(CT)、炭素繊維の方向を一方向に揃えたレイヤー 4 枚を直交積層したプレート(UD)を用意した。CP プレートは第 6 章と同じ材料から製作したが、新規に用意した CT, UD プレートでは構成炭素繊維の引張強度を 28%高めている。CP, CT プレートは厚さを 1.0 mm と 0.50 mm の 2 種類とした。UD プレートは厚さを 1.0 mm とし、表層の炭素繊維の配向を加力方向と同じとした U0、加力方向と直交とした U90 の 2 種類を用意した。ビスには CW-41RF ビス(ねじ外径 4.0 mm, 内径 2.65 mm, 全長 41 mm, うちねじ長さ 31 mm, (株)シネジック製)を使用した。プレートを試験体にビス 26 本で留め付けた。加力試験は油圧試験機により一方向繰り返し加力方式で実施し、設定変位の

0.5, 1, 2, 4, 6, 8 倍まで 1 回ずつ加力した後、荷重が最大荷重の 50%に低下するまで単調加力を実施した。試験体は CFRP プレート 6 種類に対してそれぞれ 3 体ずつ供試した。またスギ材と CFRP プレートについてそれぞれビスのめりこみ試験を実施し、めりこみ強度を求めた。めりこみ強度をもとに Johansen の降伏理論[3]により補強接合部の降伏耐力を推定し、降伏耐力の実験値 (P_y)と推定値(P_{y-EYT})を比較した。

【結果と考察】

補強接合部の破壊の形態はプレートからのビスのパンチングアウトと離脱によるもの(モード P, 2 体), モード P に土台材の割裂を伴ったもの(モード S, 9 体), 引張加力後の戻し加力時にプレートが座屈して折損したもの(モード B, 4 体), 引張加力に伴うプレートの破断(モード T, 3 体)の 4 種類に分けられた。モード P は 0.50 mm 厚の CP, CT プレートを用いた試験体各 2 体でみられた。モード S で破壊した 9 体は 1.0 mm 厚の U0, U90, CT プレートを用いた全 9 試験体であり, モード S の発生はモード P の場合に比べてプレート厚さが増え, プレートへのビスのめり込み強度が木材に対するめり込み強度を上回った結果と考えられた。モード B は 0.50 mm 厚の CP, CT プレートを用いた試験体各 1 体でみられた。モード T で破壊した 3 体は 1.0 mm 厚の CP プレートを用いた全 3 試験体であり, U0, U90, CT プレートに比べ構成炭素繊維の引張強度が低く, プレートの引張強度が, プレートおよび土台材へのビス 26 本分のめり込み強度を下回っていたと考えられた。U90 プレートの試験体に対し, U0 プレートの試験体はより大きな強度性能のばらつきを示した。試験体の K_s , P_y , P_{max} の平均では U0 が U90 を 20%以上下回っていたものの, U0,U90 の間で有意差は認められなかった($p>0.05$)が, これは U0 でのばらつきの大きさに起因する結果と考えられた。CT, CP プレートでは, ともに 0.50 mm 厚・1.0 mm 厚プレートの間で試験体の K_s に有意差は認められなかった。CT プレートでは 1.0 mm 厚プレートの試験体の P_y , P_{max} は 0.50 mm 厚プレートに対しそれぞれ 2.2, 2.4 倍の値を示したが, 前者では土台材の割裂を伴ったことから, 木材の強度性能が補強接合部の強度に関与したために, プレート厚の増加量以上の強度性能の向上がみられたと考えられた。土台材の割裂が生じなかった 1.0 mm 厚 CP プレートの試験体の P_y , P_{max} は 0.50 mm 厚プレートのそれぞれ 2.0, 2.1 倍だった。Johansen の降伏理論[3]により求めた P_{y-EYT} の値は 0.50 mm 厚 CP プレートの 3 体, 1.0 mm 厚 CP プレートの 1 体を除きすべての試験体で P_y を下回った。降伏理論による推定は接合部を構成する要素の脆性破壊が発生しないことを前提とするため, 土台材の割裂やプレートの引張破壊が生じた試験体で推定値が実験値に対し高くなったものと考えられる。ただし, 加力試験の初期に土台材の割裂を生じた U0 の 2 体を除き, すべての試験体で実験値が推定値の 80%以上を示しており, 脆性破壊がなければ適切に降伏耐力が推定できた可能性が高い。補強接合部の強度設計には, 脆性破壊の発生の可能性の考慮が必要と考えられる。

第8章 総合考察

本研究では、第1章で研究をとりまく背景と現況を整理し、第2章から第5章で腐朽が生じた木質構造物の接合部の変形挙動や残存性能の評価、および第6章と第7章でCFRPを用いた木造住宅の新たな補強方法の提案を行った。これらの成果は、既存木造住宅のさらなる安全性と信頼性の向上、そして長寿命化に寄与するものである。

参考文献

- [1] 高梨隆也, 戸田正彦, 宮内輝久, 森満範, 森拓郎(2018) 腐朽した木材における複数本ビスの接合部耐力. 木材学会誌 64(3): 122-129
- [2] 野田康信, 森満範, 戸田正彦, 森拓郎(2011) 強制腐朽処理による柱脚接合部の評価. 日本建築学会学術講演梗概集 C-1 構造 III, 277-278
- [3] Johansen KW (1949) Theory of timber connections. Int Assoc Bridges Struct Eng 9: 243-247
- [4] 日本建築学会(2006) 木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計-. 日本建築学会, 東京, pp 82-136
- [5] 日本住宅・木材技術センター(2017) 木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2017年版). 日本住宅・木材技術センター, 東京, pp 300-311
- [6] Kent SM, Leichti RJ, Rosowsky DV, Morrell JJ (2005) Effects of decay on the cyclic properties of nailed connections. J Mater Civ Eng 17(5):579-585
- [7] 平井卓郎, 安藤康光, 上田恒司(1991) 木材の釘接合せん断力と破壊形態(第1報). 木材学会誌 37(12): 1157-1166
- [8] 松岡昭四郎(1966) 木材の耐朽性に関する研究(第3報) 繊維, 半径, および接線3方向の腐朽の難易について. 林業試験場研究報告 188: 175-183
- [9] Branco JM, Sousa HS, Tsakanika E (2017) Non-destructive assessment, full-scale load-carrying tests and local interventions on two historic timber collar roof trusses. Engineering Structures 140: 209-224
- [10] 山田昌郎, 原忠, 水谷羊介, 三村佳織, 沼田淳紀, 吉田雅穂, 森満範, 末次大輔, 野田龍, 梅津啓史(2017) 木材の含水率がピロディン試験値とドライバーの貫入深さに及ぼす影響. 木材利用研究論文報告集 16: 63-70
- [11] Kanerva M, Saarela O (2013) The peel ply surface treatment for adhesive bonding of composites: A review. International Journal of Adhesion & Adhesives 43: 60-69
- [12] Buchman C, Langer S, Filsinger J, Drechsler K (2016) Analysis of the removal of peel ply from CFRP surfaces. Composites Part B 89: 352-361
- [13] 日本建築防災協会(2010) 2010年改訂版 連続炭素繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針. 日本建築防災協会, 東京