第5章 接合部の強度劣化評価に関する検討

5.1 はじめに

木部構造体の維持管理の基礎資料を得るため、まず生物劣化による接合部強度低下への影響を実験的 に明らかにするための接合部強度試験について検討した。次に、その結果に基づいた非破壊評価技術を 検討するとともに、既存建物の維持管理における補修判断基準を検討することを全体の計画としている。

接合部強度試験では、接合金物を使用した接合部モデル試験体を強制的に生物劣化させ、接合部耐力 と劣化程度との関係を明らかにすることを目的とした。そのため、まず生物劣化を強制的に発生させる 方法(以下、強制劣化方法と称する)を新たに考案することとし、これまでにイエシロアリおよび菌床 培養した腐朽菌による強制劣化方法の基本方法を明らかにした。しかし、腐朽菌による強制劣化方法の 場合、接合部を評価する上で必要な試験体数の確保や劣化程度の再現性に問題があり、これを解決する 必要があった。そこで、ファンガスセラーによる強制劣化方法を新たに検討することにした。そして、 ファンガスセラーによる強制劣化操作が完了した試験体について接合部強度試験を実施し、接合部の特 性値を算出するとともに、劣化程度との関係を検討した。また、これまでに接合部強度試験が終了した 部材による縦圧縮試験を実施し、縦圧縮強度と劣化程度との関係を検討した。更に、既存木造住宅の接 合部の劣化による耐力低下に与える影響の検証を目的としたシミュレーションについても検討した。

5.2. 実験方法

5.2.1 腐朽菌による強制劣化方法

腐朽菌による強制劣化方法として、ファンガスセラーによる方法について検討した。

(1) ファンガスセラーによる強制劣化方法

ファンガスセラーによる強制劣化方法は、接合部モデル試験体の部材に接合金物(CP-T)を取り付け る事を想定して検討した。検討の際、部材による違い、樹種の違い、腐朽発生を抑制する方法、土壌お よび試験体の保湿を維持する方法および散水パターンに着目した。

ファンガスセラーは、森林総合研究所の合板集成棟にある温度 20℃に設定された恒温室内に作製した。 ファンガスセラーの土壌には、培養瓶でナミダタケを培養した木粉培地の菌床を混ぜた腐葉土と黒土を 用いた。ファンガスセラーは、腐朽を発生させる箇所を材中間部とした土台用(写真 5.1)と材端部と した柱用(写真 5.2)の2種類を作製した。ファンガスセラーには、アカマツ、スギ、ベイマツ、ベイ ツガの4樹種を設置した。腐朽を抑制する方法として、接合部強度試験時の加力部分を散水から保護す るためストレッチフィルムで巻き固めるとともに、盛土を形成し試験体と土壌との設置部を限定するこ ととした。

土壌および試験体の保湿を維持するため、純水器(シャトルデミエース DX 型、栗田工業(株)製)と 純水をミストシャワーにより散水する装置 (ガーデンクーラーノズル、(株) タカギ製) を用いた。また、 ファンガスセラー周囲を半透明シートで覆うようにした。

散水パターンは、水分センサー付き水やりタイマー(G215、(株)タカギ製)を用いてファンガスセラ 一周囲の湿度との関係を検討した。



写真 5.1 土台用(材中間部)ファンガスセラー



写真 5.2 柱用(材端部)ファンガスセラー

5.2.2 接合部モデル試験

日本建築学会木質構造接合部設計マニュアル(2009年11月)の5.3 接合部の試験法・評価法に従って 接合部試験をした。接合部モデルは、土台-柱接合部とし、接合金物は CP-T とした。樹種は、アカマ ツ、スギ、ベイツガ、ベイマツとした。加力方法は、繰返し加力とした。繰返し加力は、ISO 11670 に 準拠した。終局変位 Du は、25mm とした。加力速度は、0.1~10mm/sの範囲で一定の加力速度とした。 加力の繰返し回数は、全てのステップで各3回とした。加力履歴は、第1ステップは、繰返しの基準を 許容短期耐力、第2ステップは、繰返しの基準を 0.1Du とした。それ以降のステップは順に、0.2Du、 0.4Du、0.6Du、0.8Du、1.0Du を繰返しの基準とした。得られた試験結果から、初期剛性、降伏荷重、 降伏変位、最大荷重、終局荷重、終局変位を算出した。

加力試験後、接合部の断面状況の観察、ピロディンによるピン打ち込み深さ、レジストグラフによる 穿孔抵抗、全乾法による含水率測定を行い、非破壊評価パラメータを得た。

5.2.3 部材縦圧縮試験

接合部強度試験が終了した部材から材長を最大 315mm とした試験片を採取した。採取した試験片は、 断面寸法、材長、質量を測定した後、単調増加荷重による縦圧縮試験を行い、密度(ρ)と縦圧縮強さ (σc)との関係を検討した。 5.3. 結果および考察

5.3.1 ファンガスセラーによる強制劣化方法

ミストシャワーによる散水状況を写真 5.3 に示す。散水は、半透明シートで覆った空間に十分ミスト 状の水を供給する事が可能であった。また、1回あたりの散水を 30 分に設定し、これを 12 時間間隔で 実施した場合、土壌と試験体の乾燥を抑止することができた。

試験体を設置しファンガスセラーの湿度条件が安定してから6ヶ月後に取出したベイツガ試験体の状況を写真 5.4 に示す。土台部材の土壌に接した部分で、腐朽発生が目視で確認できた。柱部材の土壌に接した部分は、腐朽発生は土台部材に比べて軽微だった。また、ベイツガ以外の樹種では、腐朽発生は確認できなかった。そのため、今回検討した方法では、樹種により腐朽発生の難易があると考えられ、木質構造物材の強度評価に今回の方法を用いた場合には、この点を踏まえて実験計画を立てる必要がある。

5.3.2 接合部モデル試験

ファンガスセラーで強制劣化させた試験体で作製したベイツガ接合部の荷重変形曲線を図 5.1 および 図 5.2 に示す。荷重変形曲線は、最大荷重に達した後の荷重減少は、どちらも緩やかだった。また、各 荷重ステップにおける繰り返しの影響は、繰り返し回数が増えるに従って同一荷重時の変位が若干増加 する傾向が示唆された。

接合部の試験前および試験後の状況を写真 5.5 および写真 5.6 に示す。生物劣化の発生状況は、どちらも柱よりも土台の方が顕著だった。また、写真 5.5 よりも写真 5.6 の方が、その程度は大きかった。 写真 5.6 の土台釘接合部の切断面を写真 5.7 に示す。生物劣化は、材表面から約 10mm の深さまで達していること、ほぞ穴部分周辺が他の部分と比べて含水率が高いことが断面観察により確認できた。

5.3.3 部材縦圧縮試験

縦圧縮強さを処理条件別に比較した結果を図 5.3 から図 5.6 に示す。なお、これまでに得られている イエシロアリによって強制劣化した接合部の試験結果も比較のために図にプロットした。腐朽菌により 劣化したグループおよびイエシロアリにより劣化したグループは、コントロールと比べて縦圧縮強さが 小さくなる傾向だった。

密度と縦圧縮強さとの関係を図 5.7 に示す。密度と縦圧縮強さとの関係には、正の相関が認められた ことから、部材の縦圧縮強さを推定するパラメータとしては、密度が有効と考えられる。また、これま でに得られた結果では、ピロディンによるピン打ち込み深さと密度との間に相関が認められていること から、ピロディンによるピン打ち込み深さが部材の縦圧縮強さを推定するのに有効である可能性がある と推察される。



写真 5.3 ミストシャワーによる散水状況



写真 5.4 ファンガスセラーから取出したベイツガ試験体



図 5.1 荷重変形曲線(TP ID: G4R52P28B27)





写真 5.5 接合部の状況(上:試験前、下:試験後)



図 5.2 荷重変形曲線(TP ID: G4R52P17B37)





写真 5.6 接合部の状況(上:試験前、下:試験後)



写真 5.7 土台釘接合部の切断面 (TP ID: G4R52P17B37)



^{(◇:}グループ平均の95%信頼区間、-:誤差バーおよび1標準偏差)



図 5.4 縦圧縮強さ(σc)の比較(スギ) (◇:グループ平均の 95%信頼区間、-: 誤差バーおよび1標準偏差)



図 5.5 縦圧縮強さ(σc)の比較(ベイツガ) (◇:グループ平均の 95%信頼区間、-: 誤差バーおよび1標準偏差)



図 5.6 縦圧縮強さ(σc)の比較(ベイマツ) (◇:グループ平均の 95%信頼区間、-: 誤差バーおよび1標準偏差)



図 5.7 密度と縦圧縮強さとの関係(全樹種)

5.3.4 接合部の劣化による耐力低下を考慮した木造住宅の地震時の応答解析

ここでは、既存木造住宅の接合部の劣化による耐力低下に与える影響の検証を目的としたシミュレー ション結果について報告する。

(1) 解析モデルの概要

解析モデルの概要を図 5.8 に示した。総 2 階の 6m×8m の平面サイズの整形な軸組構法住宅を想定した 解析モデルで、水平耐力要素は合板釘打ち耐力壁(昭和 56 年建告 1100 号の仕様、倍率 2.5 相当)とし た。1、2 階の存在壁量、必要壁量を表 5.1 に示したが、重い建物を想定し、各階各方向ともに必要壁量 を満足する仕様とした。壁の配置と接合部仕様を図 5.2 に示した。図中の Ta は接合部に要求される引張 耐力(必要耐力)を示す。接合部の必要耐力は壁の仕様・配置に応じた N 値計算により決定した。応答 解析には建築研究所が開発した倒壊解析ソフトウェア(*wallstat* ver.2.01)を用いた。



(a) 解析モデル骨組



(b) 解析モデルトラス要素



(c) 解析モデル外観図 5.8 解析モデルの概要

解析モデル	階	方向	床面積 (m ²)	必要壁量 (cm/m ²)	必 要壁量 (m)	壁倍率	数	存在壁量 (m)	壁量余裕率
モデルA~D	1F	Х	48.0	33.0	15.8	2.5	8	20.0	1.26
		Y	48.0	33.0	15.8	2.5	8	20.0	1.26
	2F	Х	48.0	21.0	10.1	2.5	6	15.0	1.49
		Y	48.0	21.0	10.1	2.5	6	15.0	1.49

表 5.1 解析モデルの壁量



図 5.2 解析モデルの壁配置と接合部仕様

(2) 壁、接合部の骨格曲線

鉛直構面・水平構面はトラス要素でブレース置換することでモデル化を行った。壁の履歴特性は図 5.3 に示したバイリニア+スリップ型履歴則を用いた。骨格曲線は図 5.4 に示した通り、「木造住宅の耐震診 断と補強方法(2004 年版)」の合板耐力壁に示された荷重変形関係に準拠し決定した。



図 5.3 鉛直構面の履歴特性



図 5.4 鉛直構面の骨格曲線

柱脚・柱頭接合部は図 5.5(a)に示したような回転バネ+引張圧縮バネ(せん断に対しては剛)を設定 した。引張・圧縮バネの履歴特性は図 5.5(b)に示したような圧縮側弾性+引張側スリップ型で、回転バ ネの履歴特性は図 5.5(c)に示したようなスリップ型とした。骨格曲線は接合部の必要耐力が 5.1kN と 15kN である仕様については実験値を参考に図 5.6 に示した CP-T (T 形金物)と HD15kN(ホールダ ウン金物)の骨格曲線を用い、必要耐力が 3.4kN と 7.5kN の仕様については CP-T の骨格曲線を、必要 耐力の比率に応じて耐力を増減させることで設定した。



(a) 接合部の概念図

(b) 引張・圧縮バネの復元力特性図 5.5 接合部のモデル化概要

(c) 回転バネの復元力特性





(3) 接合部の劣化による強度低下の想定

接合部の劣化による強度低下は、接合部の実験において約 50%耐力が低下する結果に基づき、解析モデルの 1F の図 5.7 に示した範囲の接合部の耐力が 50%に低下した状態(モデル A~D)を想定し応答解析を行った。



図 5.7 接合部の耐力低下の範囲 (点線に囲まれた部分の柱脚柱頭が耐力低下すると仮定)

(4) 解析モデルの重量

解析モデルの重量は木造住宅の耐震診断と補強方法における精密診断の床面積当たりの重量表から 「重い建物」に相当する重量を下記の通り設定した。

$1F: 125 \text{ kN} \quad 2F: 96 \text{ kN}$

(5)入力地震波

応答解析の入力波には建築基準法で規定する極稀地震相当の加速度応答スペクトルに適合するように 作成した人工地震波(第1種地盤補正スペクトル:ランダム位相)を用いた。時刻歴波形の計測時間は 30秒で包絡線関数はJennings型とした。本解析モデルでは17%が稀地震、85%が極稀地震に相当する。 応答スペクトルと時刻歴波形を図 5.8 に示した。(以降、BSL17%、BSL85%と呼ぶ)



(6) 解析結果

各解析モデルの各階各方向の最大層間変形を表 5.2、図 5.9 に示した。図 5.10 に柱脚の浮上り量の最 大値をグラフで示した。

大地震相当の地震波(BSL85%)の入力では、接合部の耐力低下の範囲が広いほど 2F の層間変形は 大きくなる傾向となった。1F の層間変形はモデルA、B、C は耐力低下の範囲が広いほど大きくなる傾 向となったが、モデルD はモデルCよりも小さい結果となった。モデルD では 1F と 2F の剛性の差が 変わったためと考えられる。中地震相当の地震波(BSL17%)でも、同様の傾向となった。

柱脚の浮上りは耐力低下の範囲が広いほど大きくなる傾向となった。モデル C では接合部の耐力低下の平面的バランスに差があったため、X 方向の地震波入力で、Y0 通りと Y8 通りで偏心が大きくなる傾向となった。

	地震波	X方向				Y方向				柱脚浮上り	
解析モデル		1F		2F		1F		2F		vtita	vtita
		Y0通り	Y8通り	Y0通り	Y8通り	X0通り	X6通り	X0通り	X6通り	入力中」	Y刀回
モデルA (耐力低下無し)	BSL 17%	13	13	12	12	14	14	15	15	1	1
	BSL 85%	114	114	52	52	105	105	80	80	3	5
モデル B (1/4エリア耐力低下)	BSL 17%	13	14	12	13	15	14	16	15	2	2
	BSL 85%	111	118	60	52	104	103	86	85	7	7
モデルC (1/2エリア耐力低下)	BSL 17%	14	16	12	16	15	15	17	17	2	2
	BSL 85%	108	121	60	55	96	96	99	99	9	9
モデル D (全域耐力低下)	BSL 17%	15	15	15	15	16	16	19	19	2	2
	BSL 85%	118	118	74	74	100	100	105	105	9	11

表 5.2 解析モデルの層間変形(単位:mm)









(7) まとめ

ここでは、既存木造住宅の接合部の劣化による耐力低下に与える影響の検証を目的としたシミュレーションを実施した。3パターンの耐力低下の範囲を想定した解析モデルに4種類の地震波を与えた結果、 接合部の耐力低下の範囲が広いほど2Fの層間変形は大きくなる傾向となった。1Fの層間変形は、耐力 低下の範囲が半分になるモデルまでは範囲が広いほど大きくなる傾向となったが、全面的に耐力低下し た解析モデルは半分が耐力低下した解析モデルよりも層間変形が小さい結果となった。1Fと2Fの剛性 の差が変わったためと考えられる。柱脚の浮上りは耐力低下の範囲が広いほど大きくなる傾向となった。 接合部の耐力低下の平面的バランスに差がある解析モデルでは、X方向の地震波入力で偏心が大きくな る傾向となった。

以上の検討結果から、接合部の耐力低下の範囲の広さ、範囲の分布が構造物全体の地震時の応答に影響を及ぼすことが示唆された。