

# 木製家具製作のための CAE 適用手法の開発 (第 2 報)

## Development of the CAE application method for manufacturing wooden furniture (2nd)

会津若松技術支援センター 産業工芸科 関澤良太 吉田智  
電子・機械技術部 機械・加工科 坂内駿平

本研究では、ダボ接合した試験体の破壊試験を行い、その破壊挙動を確認した。また、その破壊試験と CAE の比較を行うことで、接合部における CAE 解析の妥当性を検証した。本研究より、H 型試験において、強度試験の結果と概ね合致する妥当な結果を得ることができた。また、CAE 解析においては複雑な応力状態を考慮し、構造全体の挙動だけでなく、個別の部品の応力を分析することで、定量的な評価が可能になると期待される。

Key words: 木材、木製家具、強度解析、構造解析

### 1. 緒言

木製家具設計では、経験則や既存商品に基づく強度設計により、過剰な強度又は強度不足による再設計が発生し、開発コストがかかることが課題であり、その解決策として CAE (Computer Aided Engineering, 以下 CAE) の活用が期待されている。しかし、木材特有の異方性や接合部の複雑さから、既存の CAE 解析手法をそのまま適用することは困難である。そこで、本研究では、木製家具の強度を CAE により解析する手法の確立を目標とする。前年度は、県産杉材における CAE 解析に必要な物性値を取得した。また、物性値取得において、ひずみゲージの代替手法として画像相関法 (Digital Image Correlation, 以下 DIC) に着目して、DIC の妥当性の検証を行った。加えて強度試験と CAE の結果を比較することで、CAE の妥当性を検証した。その結果、DIC 測定では、繊維方向のヤング率において妥当な物性値が得られた。また、CAE 解析において物性値に直行異方性を設定することで、強度解析の結果と概ね合致する妥当な結果を得ることができた。しかし、細部の破壊挙動、特に負荷が大きく破断が起きやすいと考えられる接合部において、CAE 解析が妥当であるか検証する余地がある。

そこで本年度は、接合部に着目して、ダボ接合した試験体の破壊試験を行い、その破壊挙動を確認した。また、破壊試験の結果と CAE 解析の結果とを比較することで、接合部における CAE 解析の妥当性を検証した。

### 2. 実験

#### 2. 1. 木材の異方性

CAE 解析では、木材が持つ材料の方向によって強度が異なる性質 (異方性) を考慮する必要がある。前年度の研究に引き続き、直行する 3 軸方向を繊維方向 (L 方向)、半径方向 (R 方向)、接線方向 (T 方向) と定義した<sup>1) 2)</sup>。木材の直交する 3 軸方向を図 1 に示す。

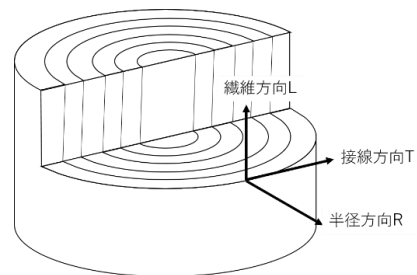


図 1 木材の直交する 3 軸方向

#### 2. 2. 試験体の接合部の数

椅子のような接合部の多い家具を試験体にした場合、複数の応力が関与するため、CAE 解析の妥当性の評価が複雑になる。そのため、単純化した接合部の少ない H 型、及び T 型の 2 種類の試験体を作成して、試験した。

#### 2. 3. H 型試験 (試験体、及び試験方法)

試験体は、協力企業より提供を受けた県産杉材を使用した。試験体の構成および寸法を以下に示す。

- ・ダボサイズ: 直径 8 × 長さ 40 [mm]
- ・支柱サイズ: 幅 20 × 厚み 20 × 高さ 100 [mm]
- ・梁サイズ: 幅 20 × 厚み 20 × 長さ L [mm]
- ・梁の長さ (L): 40、60、80、280 [mm] の 4 種類
- ・サンプル数: 各種類につき 2 体 (計 8 体)

梁については、長さ方向を L 方向とした。また、負荷方向が R 方向となるように接合した。H 型試験体の構成を図 2 に示す。

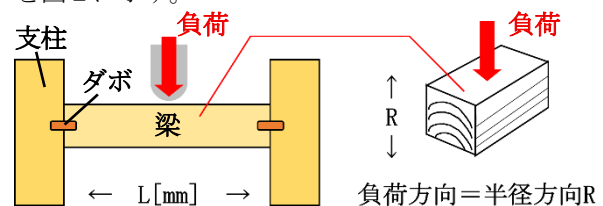


図 2 H 型試験体の構成図

試験体の作成においては、ダボを挿入するために支柱側面(20×100[mm])及び梁の木口(20×20[mm])の各中心点に、直径7.8[mm]、深さ20[mm]の下穴を設けた。接合には、接着剤として酢酸ビニル樹脂系エマルジョン系接着剤(コニシ株式会社製、ボンド 木工用 CH18)を塗布したのち、木ダボで圧入接合した。また、DIC解析のためにランダムドットパターンを各試験体に施した。

試験方法として、JIS Z 2101 木材の試験方法 15 曲げ試験を参考にした。精密万能試験機(オートグラフAG-2000E、(株)島津製作所製)を使用し、梁の中央(L/2[mm])に対して、鉛直下向きに荷重を負荷した。試験荷重速度は5[mm/min]とした。固定条件は、支柱が八の字に開かないように固定したものと同固定しないものの2種類として、梁の長さLが同じ試験体で比較した。H型試験の様子を図3に示す。



図3 H型試験の様子(L40[mm])

圧縮治具は、荷重点のめり込みの影響及び試験体への干渉を考慮し、梁の長さ(L)が280[mm]の試験体には先端の曲率半径65mmの治具を採用し、長さ40、60、80[mm]の試験体には曲率半径6mmの治具を採用した。

## 2. 4. T型試験(試験体、及び試験方法)

試験体は、H型試験と同様に、協力企業より提供を受けた県産杉材を使用した。試験体の構成および寸法を以下に示す。また、T型試験体の構成図を図4に示す。

- ・ダボサイズ: 直径8×長さ40 [mm]
- ・支柱サイズ: 幅20×厚み20×高さ100[mm]
- ・梁サイズ: 幅20×厚み20×長さ140[mm]

梁の長さ方向をL方向とした。また、接合部における木材の異方向性が試験結果に与える影響を検討するため、荷重方向がR方向、及びT方向となる2種類の試験体を作製し、試験した。これに基づき、梁のR方向と荷重方向が一致する試験体を「R-枝番」、T方向と荷重方向が一致する試験体を「T-枝番」と表記する。サンプル数は各条件6体ずつ、計12体とした。

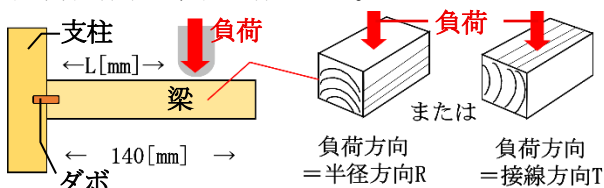


図4 T型試験体の構成

試験体の作成においては、H型試験片と同様の条件でダボ接合した。また、DIC解析のためにランダムドット

パターンを各試験体に施した。

試験方法は、精密万能試験機(オートグラフAG-2000E、株式会社島津製作所製)を使用し、各試験体の荷重位置に対して鉛直下向きに荷重を負荷した。試験荷重速度は5[mm/min]とした。荷重位置L(支柱側面から荷重点までの距離)については、20、40、60、80、100、120[mm]の計6種類とした。固定条件は、支柱の傾きを防ぎ、CAE解析で再現しやすいように、専用治具を用いて支柱上部を固定した。T型試験の様子を図5に示す。



図5 T型試験の様子

圧縮治具については、試験体への干渉を防止するとともに、全試験において同一条件で比較を行うため、先端の曲率半径6mmを採用した。

## 2. 5. H型、及びT型試験とCAE解析の比較方法

### 2. 5. 1. 解析共通条件

実試験との比較のため、ANSYSを用いた構造解析を実施した。解析モデルは各試験と同様の構成とし、材料には直交異方向性を適用した。各部品の異方向性の方向は、試験体の木目方向と一致させ、物性値は前年度の研究で得られた杉の値を用いた。荷重条件は、図6に示すとおり各荷重位置に、圧子接触面を模した幅2[mm]の領域を作成し、各実試験の最大試験力を荷重した。重力加速度は9.81[m/s<sup>2</sup>]とした。なお、本解析ではボンド接着は考慮していない。

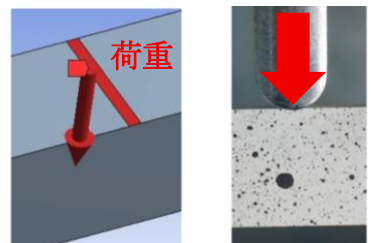


図6 H型、及びT型試験の荷重条件

境界条件の共通設定として、ダボ結合部には圧入による初期応力を設定した。部品同士の接触面は、滑りを許容せず分離のみを許容する設定とした。また、実試験における大変形を考慮し、解析オプションとして大変形効果を適用した。

## 2. 5. 2. 各モデルの境界条件

試験体の形状に応じた個別の固定条件を以下に示す。

- (1) H型試験体：固定箇所は図7のとおり、2本の支柱の底面とした。
- (2) T型試験体：固定箇所は図8のとおり、支柱底面および治具が接触する側面とした。

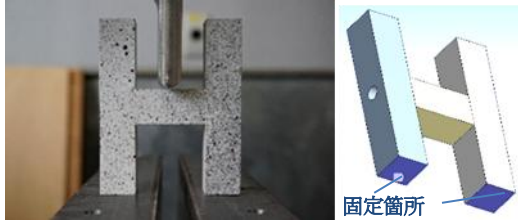


図7 H型試験の固定条件

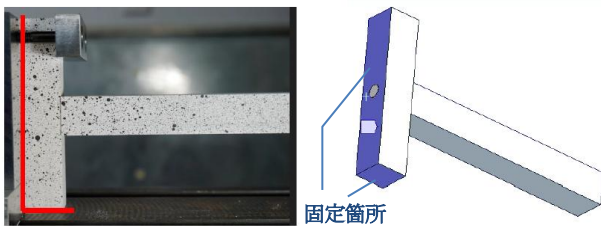


図8 T型試験の固定条件

## 3. 結果と考察

### 3. 1. H型試験

#### 3. 1. 1. H型試験の結果

各試験体の最大試験力を表1に示す。

表1 H型試験の各最大試験力

試験体	最大試験力[N]
L40-固定	1362.7
L40-固定なし	1702.7
L60-固定	1881.2
L60-固定なし	1592.4
L80-固定	1655.9
L80-固定なし	1761.8
L280-固定	1647.4
L280-固定なし	1145.6

代表的な L40[mm] (固定なし) の試験後の写真を図9に示す。L40、60、80[mm]の試験体では、固定条件に関係なく、梁の端部に横割れが発生し、梁が繊維に沿って上下方向に割れた。これは、ダボから受ける力によって梁のダボ穴上部が拡張され、木目に沿って破壊したと考えられる。この破壊挙動の図解を図10に示す。また、L40、60mmの固定無しの試験片では、支柱の底部に縦割れが発生した。これは、支柱が傾斜し開こうとする水平力と力点に近い底面の摩擦力が原因

と考えられる。

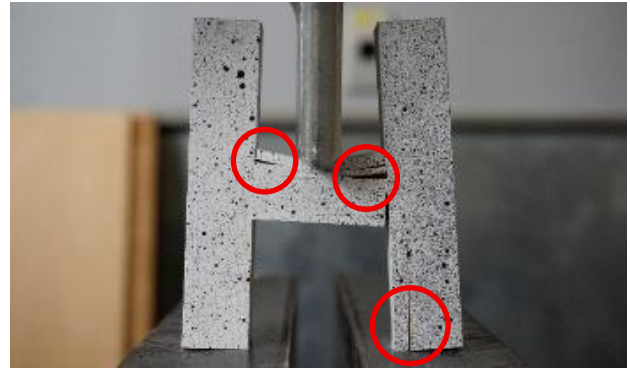


図9 H型試験 (L40[mm] 固定なし) の試験後の写真

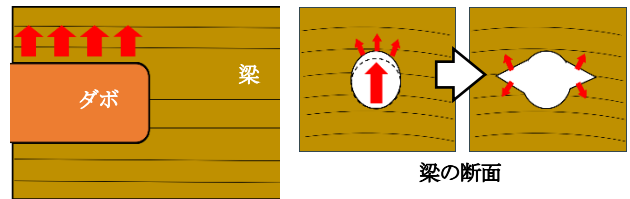


図10 H型試験 梁のダボ穴内での力の図解

L280[mm] (固定なし) の試験後の写真を図11に示す。L280mmの試験片では、固定条件に関係なく、梁の中央下部にジグザグ状の縦割れが発生した。これは、曲げ試験でよくみられる破壊であり、実製品でも起こりうる破壊挙動である。また、梁の端部、支柱の底部に割れは見られなかった。

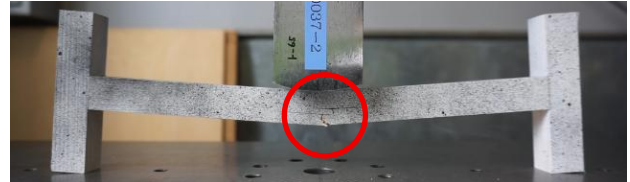


図11 H型試験体 (L280[mm] 固定なし) の試験後の写真

#### 3. 1. 2. H型試験と CAE 解析の比較結果

L40[mm] (固定なし) の CAE 解析結果を図12に示す。

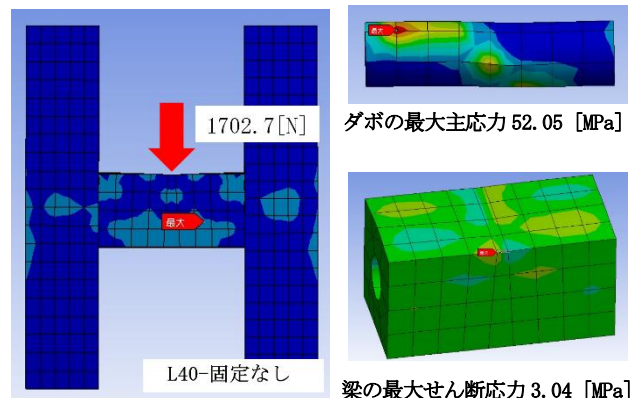


図12 H型試験体 (L40[mm] 固定なし) の CAE 解析結果

梁の長さ 40mm (固定なし) の試験結果と同じ最大試験力 1702.7[N] を梁の中央部に加えたところ、その最大せん断応力は、3.04[MPa] となった。

文献によれば、曲げ試験における人工乾燥杉材のせ

ん断強さは、5%下限値が 3.79 [MPa]、平均値が 5.47 [MPa]と報告されている<sup>3)</sup>。本解析結果はこれらの値と近いことから、解析モデルの妥当性が確認されたといえる。また、ダボの最大主応力は 52.05 [MPa]となった。

### 3. 2. T型試験

#### 3. 2. 1. T型試験の結果

各試験体の最大試験力を表 2 に、試験力と試験機のストロークとの関係を図 1 3 に示す。

表 2 T型試験の各最大試験力

試験片	最大試験力 (N)
R-1 (L20mm)	1023.8
T-1 (L20mm)	1125.1
R-2 (L40mm)	322.4
T-2 (L40mm)	357.8
R-3 (L60mm)	211.1
T-3 (L60mm)	189.1
R-4 (L80mm)	135.9
T-4 (L80mm)	115.1
R-6 (L120mm)	69.9
T-6 (L120mm)	80.6
R-7 (L100mm)	90.8
T-8 (L100mm)	104.8

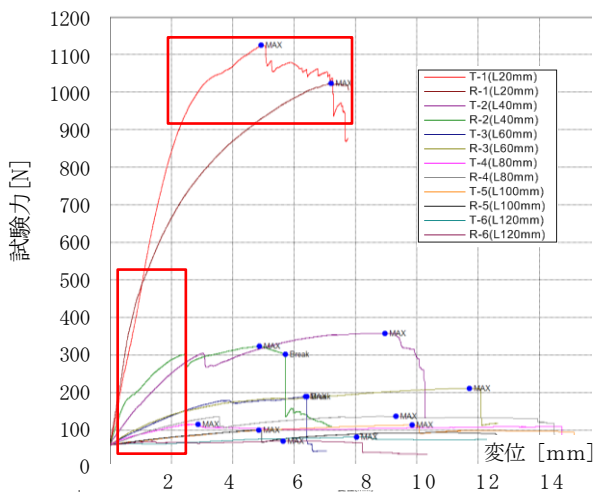


図 1 3 T型試験の試験力-ストロークグラフ

試験力-ストロークグラフから、梁の木目方向が異なっても、負荷位置が同じ場合、初期の傾き（弾性域）に大きな差は無いことが分かった。

また、負荷位置が支柱に近い L20[mm]の試験体は、最大試験力が 1000 [N]以上と他の試験体と比較して大きい。これはダボに近い場所に負荷をかけているためと考えられる。一方で、負荷位置が支柱から離れてい

くほど、最大試験力が小さくなっている。これは梁が傾くにつれて鉛直下向きの荷重が、梁の長手軸方向荷重とそれに垂直な方向の荷重の2つの分力になり、梁がダボから滑って抜ける力に分散されて、支柱と梁との隙間が開いたためと考えられる。この挙動についてのイメージ図を図 1 4 に示す。

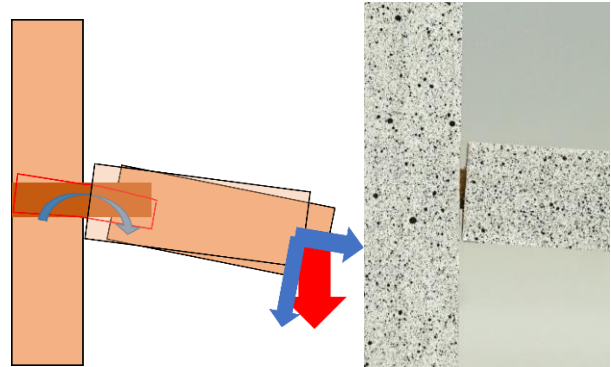


図 1 4 2つの分力（左）と生じた隙間（右）

また、R-4 (L80[mm])、R-6 (L120[mm])、T-6 (L120[mm])、T-8 (L100[mm]) では、梁の端部に、水平方向の亀裂が発生した。代表例として R-4 (L80[mm]) の試験体を図 1 5 に示す。

当初、R 方向へ負荷する試験体において、木目に沿って水平な亀裂が生じやすいと予測したが、実際には T 方向へ負荷した試験体においても同様の破壊が確認された。この結果から、本試験の条件下では、せん断破壊の発生と木目方向の相関性は低いと考えられる。

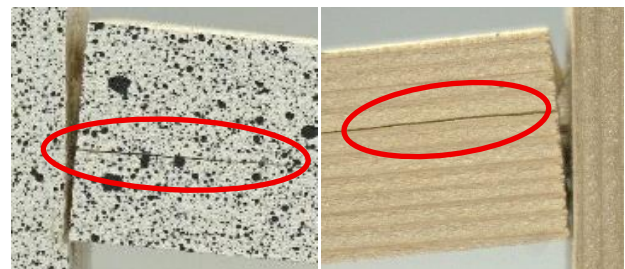


図 1 5 R-4 (L80[mm]) の試験結果

荷重位置が支柱に近い R-1 および T-1 では、支柱側のダボが上方へ傾斜する挙動が観察された。この変形の要因はダボに作用する曲げ応力、ダボ自体の曲げ変形、あるいはダボのめり込みに伴うダボ穴拡張であると推察される。試験体 T-1 の試験前及び試験後の写真を図 1 6 に示す。



図 1 6 T-1 (L20[mm]) 試験前（左）、試験後（右）

表3 T型試験の各CAE解析結果

試験体	最大主応力 [MPa]	最大せん断応力 [MPa]	備考(最大せん断応力の発生箇所)
R-1	151.8	15.5	圧子の接触部で発生
T-1	151.8	16.4	〃
R-2	100.8	4.7	梁のダボ穴内の上部に発生
T-2	114.1	4.4	圧子の接触部で発生
R-3	96.9	5.4	梁のダボ穴内の上部に発生
T-3	92.1	3.5	梁のダボ穴内の上部に発生
R-4	80.3	4.9	〃
T-4	81.0	2.9	〃
R-6	58.0	3.2	〃
T-6	74.0	2.7	〃
R-7	78.3	5.3	〃
T-8	98.3	2.7	〃

### 3. 2. 2. T型試験とCAE解析の比較結果

代表例として、試験体R-1 (L20[mm]) のCAE解析結果を図17及び図18に示す。また、各T型試験のCAE解析結果を表3に示す。

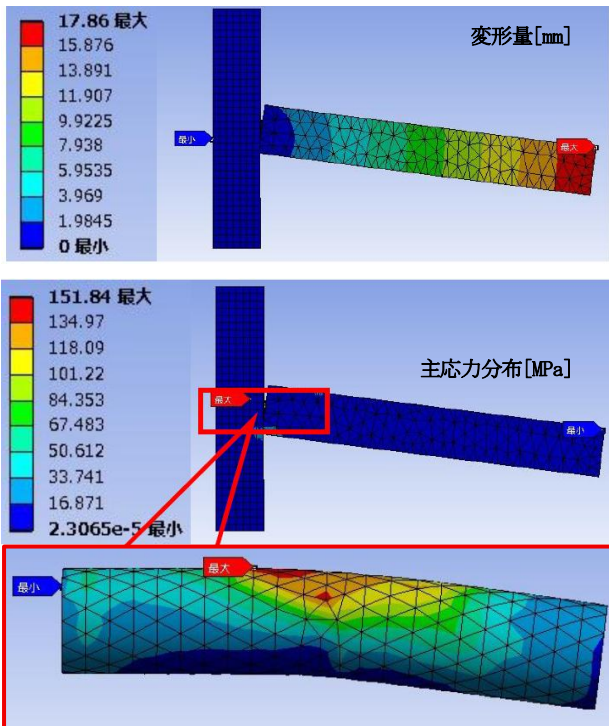


図17 R-1 (L20[mm]) のCAE解析結果：変形量、主応力

各試験体において、破壊試験と同様の条件で、最大試験力の負荷を加えたところ、最大主応力は、すべての試験体においてダボの中央部付近に発生した。また、最大せん断応力は、R-1, T-1, T-2の試験体においては、圧子の接触部に、その他の試験体では梁のダボ穴内の上部に発生した。

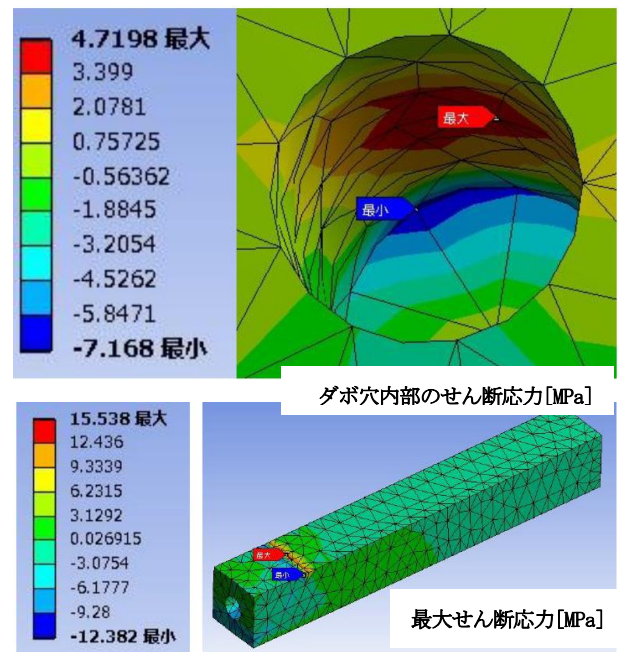


図18 R-1 (L20[mm]) のCAE解析結果：最大せん断応力

文献によれば、スギ材の平均曲げ強さは39.8[MPa]と報告されている<sup>4)</sup>。本解析結果における最大主応力はダボの中央部に発生し、すべての条件でこの文献値を上回ったが、実試験においてダボの破断は観察されず、解析結果と実挙動に相違が生じた。

一般に、材料値としての「曲げ強さ」は、材料を単純に曲げて壊したときの数値である。これに対し、本研究のような接合部付近では、押し潰される力や曲げる力等の複数の力が混ざりあった極めて複雑な応力状態であり、単純な強度比較のみでは破壊の挙動を正確に判定できないと考える。したがって、CAE解析においてはこの複雑な応力状態を考慮し、構造全体の挙動の

みならず、接触面、ダボ単体、およびダボ穴周囲といった各構成要素の応力分布を詳細に分析することで、より定量的な評価が可能になると期待される。

例えば、継手に着目した解析においては、実物の降伏点（限界値）を考慮した解析を行い、接合部の曲げモーメントを算出することで、当該継手特有の「限界モーメント（破壊に至る曲げモーメント）」を特定することが可能となる。曲げモーメント、及び限界モーメントのイメージ図を図19に示す。

同一の企業が同一の材料および加工工程で製作する継手であれば、その限界モーメントは概ね一定の値に収束すると考えられる。したがって、家具のCAE解析において、あらかじめこの限界モーメントを把握していれば、各継手にかかる負荷を「限界値に対する〇〇%」といった数値で示すことができ、部位ごとの危険度を定量的に評価できると考える。

このように、製品全体だけでなく接合部等の各部位に応力・モーメント解析を適用することで、不均一な性質を持つ木製品においても、客観的かつ定量的な強度評価が可能になると考える。

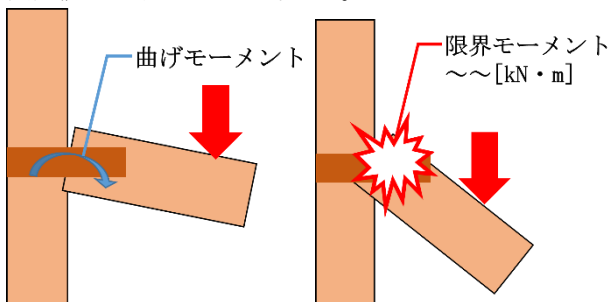


図19 曲げモーメント、及び限界モーメントのイメージ

## 4. 結言

本研究では、接合部に着目して、ダボ接合した試験体の破壊試験を行うことで、その挙動を確認した。更に破壊試験の結果とCAE解析の結果とを比較することで、接合部におけるCAE解析の妥当性を検証した。結果は以下のとおり。

### 4. 1. 実試験

#### (1) H型試験

- ・支柱の固定の有無による大きな影響はない。
- ・梁の長さは、破壊試験における最大試験力、亀裂の生じる位置や向きに影響する。

#### (2) T型試験

- ・木目方向の差による弾性域の大きな差異はない。また、破壊挙動についても木目方向に依存せず、繊維に沿った亀裂が生じることが確認された。
- ・負荷位置が支柱から離れるにつれて最大試験力が小さくなり、支柱と梁との隙間が開いていく破壊挙動となる。

## 4. 2. CAE解析結果、及び実試験との比較

- (1) H型試験のCAE解析において、実試験結果と同じ最大試験力、及び負荷条件を適用した結果、文献値に近いCAE解析結果を得ることが出来た。
- (2) T型試験のCAE解析において、実試験結果と同じ最大試験力、及び負荷条件を適用した結果、最大主応力はダボ中央部に発生した。その値は、すべての条件で文献値を上回ったが、実試験ではダボの破断は観察されず、解析結果と実挙動に相違が生じた。

これは、T型試験の文献値が材料を単純に曲げて壊したときの数値である一方で、本研究における実試験の接合部付近では、複雑な応力状態が生じているためと考える。

以上のことから、木材へのCAE解析手法の適用については、接合部付近の複雑な応力状態を考慮し、構造全体の挙動だけでなく、梁や支柱、ダボといった個別の部品の応力を詳細に分析することで、定量的な評価が可能になると期待される。

本研究の結果を踏まえ、今後はCAE解析モデルの精度をさらに向上させるとともに、次年度は既存の木製品に対して本解析手法の適用を試みる予定である。実製品を用いた強度試験結果と比較検証を行うことで、木材接合部におけるCAE解析手法の実用の可能性を明らかにしたい。

### 謝辞

本研究を進めるにあたって、県産杉材をご提供くださった株式会社光大 代表取締役 根本昌明 様をはじめ社員のみなさまに深く感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 関澤良太, 吉田智, 坂内駿平. 木製家具製作のためのCAE適用手法の開発. 令和6年度福島県ハイテクプラザ研究報告書, 2025.
- 2) 澤田稔. 直交異方性材料としての木材の弾性および強度. 「材料」第12巻 第121号. 昭和38年10月. p751.
- 3) 山裾伸浩, 岸本勇樹. 和歌山県産スギ, ヒノキのせん断強度およびめり込み強度. 和歌山農林水研報 1. 2013, p131-142.
- 4) “宮崎県木材利用技術センター/木材の豆知識”. 宮崎県木材利用技術センター. <https://www.pref.miyazaki.lg.jp/contents/org/kankyo/mokuzai/wurc/mametisiki/tuyosa/tuyosa.html>, (参照 2026-02-20).