

木製履物の設計のための FEM 解析の評価

Evaluation of FEM analysis for wood footwear design

会津若松技術支援センター 産業工芸科 齋藤勇人 出羽重遠
 応募企業 佐原桐材店

FEM 解析を使用した木製品の設計を行うことを目的に、実試験(DIC)と FEM 解析の結果を比較する手法で木製品に対する FEM 解析の有用性を評価した。小試験片の圧縮試験では DIC によるひずみ測定結果と FEM 解析の結果の両者に傾向の一致が確認でき、木繊維と直交する方向のひずみの集中位置は木材の割裂破壊の位置と同じであった。また、実製品に荷重を加える境界条件を指定した FEM 解析の結果から得られる木製品の各部の変位は、DIC による変位の測定結果と傾向が一致した。

Key words: 木製品、FEM 解析、DIC

1. 緒言

応募企業の佐原桐材店では桐下駄の進化形の履物の開発に取り組んでいる。その履物は内部が空洞になった構造(図1)になっており、木製の履物ながらクッション性を有している特徴がある。(特許番号:特許第6345362号)しかし、履物の形状は実際に製作してみて強度や使用感を確かめながら試行錯誤で決めているため、製品開発に非常に手間がかかっている。



図1 開発している履き物の例

そこで、応募企業は有限要素法(Finite Element Method; FEM)解析を使用した手法で形状のブラッシュアップを効率的に行い、新製品開発のスピードアップを図りたいと考えた。コンピュータシミュレーションで応力や変形・ひずみの計算などの構造計算を行う FEM 解析は、工業製品の設計の精度向上には欠かせない技術である。FEM 解析の結果を利用すると製品試験を模擬できるため、試作回数の削減や、過剰設計の抑制、トータルの工期の短縮化が期待できる。しかし、木製品を対象にして FEM 解析を行うことは福島県内の木製品加工業者の間ではあまり普及していない。木材は繊維が束ねられた構造になっており、金属やプラスチックなどの均質な材料とは異なり、部材の方向によって機械物性が異なるため、解析条件や、実際と解析結果の一致性などのノウハウ的な情報に乏しいのが現状であった。

また、履物に荷重が加わったときに各部に生じるた

わみをどの程度に想定して設計すれば、履物が適度なクッション性を得ることができるのかが不明であった。つまり、履物の FEM 解析による設計の指標が明らかでないことが理由で、取り組むことができなかった。

そこで本技術開発では、木製履物の製品開発のスピード向上及び品質向上に資することを目標として、木質材料を素材とした実物の履物について、実際に荷重を加える実試験を行って設計の指標を得るとともに、その実試験の結果と FEM 解析の結果の一致性を確かめることとした。FEM 解析と実試験の結果に一致性が得られるのであれば、従来からある製品試験で強度や使用感を確かめる製品開発に、FEM 解析を活用することが可能となる。

2. 実験

FEM 解析を使用した木製品の設計を行うことを目的に、実試験と FEM 解析の結果を比較する手法で木製品に対する FEM 解析の有用性についての評価を行った。実試験では精密万能試験機による圧縮試験を行うと同時にデジタル画像相関法(Digital Image Correlation; DIC)を使用してひずみ測定を行った。一方で、FEM 解析については解析ソフトウェア群“ANSYS”(ANSYS 社製)を使用して実施することにした。DIC は測定対象の変形前後の画像を解析演算することでひずみ・変形を計測する手法である。木質材料に DIC を使ってひずみ測定を行った例^{1), 2)}はあり、いずれもひずみゲージの測定結果とよく一致している。

そこで、FEM 解析が木製品の設計に対しても有効であるか調べるために、単純化した小試験片について FEM 解析と実試験の結果の比較を行い、一致性が良好であることを確かめたのちに、実際の履物の変形挙動について実試験と FEM 解析で比較を行い、実用性を確かめることとした。

2. 1. 小試験片の圧縮試験

図2の形状のコの字型試験片について木繊維の走る方向を変えた2種類を製作した。この試験片の開口端から5[mm]の位置を中心として、半径5[mm]の半円筒型の治具でクロスヘッドの送り速度1[mm/min]で圧縮した。試験には精密万能試験機(島津製作所製 Auto Graph AG-10kNE)を使用し、このときに圧縮中の試験片をカメラ撮影して、DICによるひずみの測定を行った(図3)。なお、ANSYSに入力する材料物性は直交異方性材料として、物性値は文献値を補足して対応した(表1)。金属やプラスチックなどの均質の工業材料と木材が、機械物性面で大きく異なるのが、この直交異方性材料である点にあり、セルロースを主成分として作られた木繊維が、接着剤の役割を果たすリグニンにより年輪状に束ねられて木材を造っているために、繊維の走る方向と、繊維に直角する方向かつ年輪に直交する方向、年輪の接線方向の3方向で機械物性が著しく異なる。試験片を木繊維の方向を変えて2種類製作したことも、このような理由による。

表1 FEM解析用の桐の材料物性

記号	概要	物性値	
E_L	ヤング率 L 方向 (繊維方向)	5880[MPa]	※1
E_R	ヤング率 R 方向 (半径方向)	580[MPa]	※1
E_T	ヤング率 T 方向 (接線方向)	245[MPa]	※1
μ_{LR}	ポアソン比 LR 面 (柁目面)	0.4	※1
μ_{RT}	ポアソン比 RT 面 (木口面)	0.69	※2
μ_{LT}	ポアソン比 LT 面 (板目面)	0.6	※1
G_{LR}	せん断弾性率 LR 面 (柁目面)	512[MPa]	※3
G_{RT}	せん断弾性率 RT 面 (木口面)	376[MPa]	※3
G_{LT}	せん断弾性率 LT 面 (板目面)	118[MPa]	※3

※1 木材工業ハンドブックより引用³⁾および単位換算した。

※2 広葉樹 20 種類の平均値を採用した。⁴⁾

※3 以下の実験式から推定した。⁴⁾

$$G_{LR}/E_L = 0.087, G_{LT}/E_L = 0.064, G_{RT}/E_L = 0.020$$

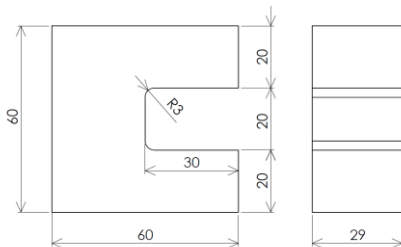


図2 コの字型試験片



図3 測定機器

2. 2. 履き物の変形挙動の解析

佐原桐材店提供の履物を精密万能試験機(島津製作所製 Auto Graph AG-2000E)にて図4に示す治具を使って圧縮試験を行った。この治具にはバネを使用した簡易の荷重計を2つ取り付けてあり、これらの圧縮量をカメラ画像より測定することで2か所に作用している荷重を推定できるようにした。また、木材に直接に接する部分を金属などの硬質な材料にしてしまうと、木材に部分的な永久変形を生じさせてしまい、FEM解析の結果と比較する場合に不都合が生じると考えられるため、接触面には半径20[mm]の半円筒形状のウレタン発泡材を取り付けた。なお、圧縮試験では30[mm/min]のクロスヘッドの送り速度で最大700[N]の荷重がかかるまで圧縮し、この試験と同時にDICによるひずみ測定を行い、荷重が加わった時の履物の変形挙動の確認を行った。試験品の履物は図5の試験写真に示す形状で、かかと部分が切り離されていてたわみやすい構造となっており、踏み面に荷重がかかると片持ちで変形しながら、くびれ部分と切り欠き部分が上下で接触してストッパーの役割を果たし、大きく変形するが亀裂などの物理的な破壊が生じにくい構造になっている。なお、2か所で荷重を加えて変形を確認する意義は、歩行時の足裏圧力の時間変化例の報告⁵⁾を参考にして歩行の1コマを考え、2か所にピークが得られる圧力分布を想定した。このときDICで得られた結果1コマの変位と荷重の条件をもとにFEM解析を行った。

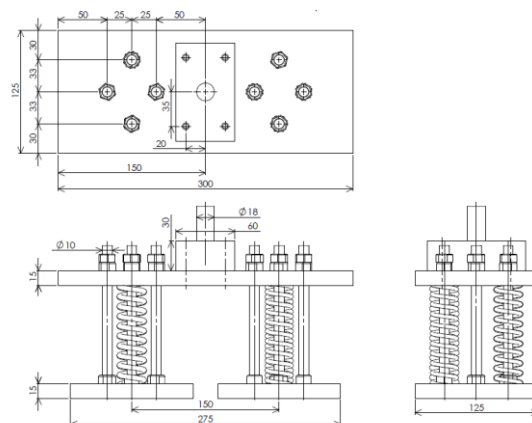


図4 圧縮試験に使用した治具



図5 圧縮試験の様子

3. 結果と考察

3. 1. 小試験片の圧縮試験

2種類のコの字型試験片について、それぞれ実試験とFEM解析の結果を比較した。まずは木繊維が水平方向に走った試験片について、試験機にて圧縮荷重を加える実試験と同時にカメラ撮影を行ってDICによるひずみ測定を実施した。特徴が現れた鉛直方向のひずみを表示させた結果を図6の上の図に示す。ひずみはコの字型の外周側で引張りひずみ、内周側で圧縮のひずみが生じており、試験片を上下で引き裂く方向に作用していることがわかる。実際に破壊するまで圧縮すると、図6の右下の図のようにDICにより鉛直方向のひずみが集中している位置で引き裂くように破断した。このときの状態を、下面を固定、実試験と同じ圧縮位置に同じく治具の解析モデルを作成して、1[mm]の強制変位の境界条件でFEM解析したところ、図6の左下のようにDICによく類似したひずみの分布がみられた。

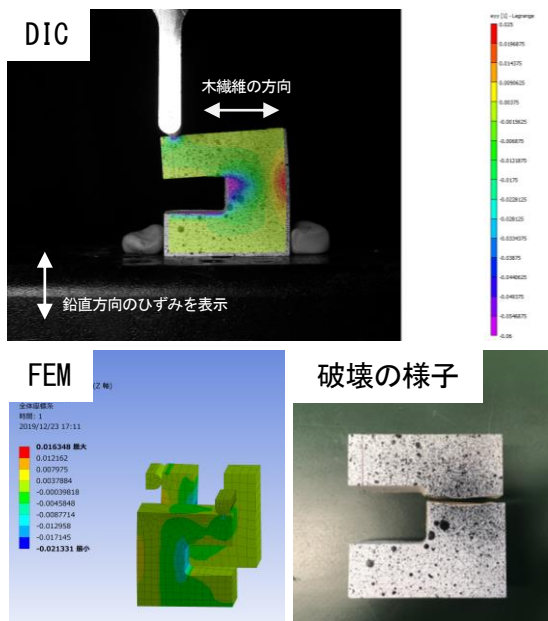


図6 木繊維が水平方向の場合の試験結果

また、木繊維が鉛直方向に走った試験片について、試験機にて圧縮荷重を加える実試験と同時にカメラ撮

影を行ってDICによるひずみ測定を実施した。特徴が現れた水平方向のひずみを表示させた結果を図7の上の図に示す。図6の結果と対照的に圧縮した辺の上面に圧縮のひずみ、その下面に圧縮のひずみのピークが現れ、圧縮した辺の付け根部分を引き裂く方向に作用していることがわかる。また、実際に破壊まで圧縮すると、図7の右下の図のようにDICにより水平方向のひずみが集中している位置で引き裂くように破断した。このときの状態を、下面を固定、実試験と同じ圧縮位置に同じく治具の解析モデルを作成して、1[mm]の強制変位の境界条件でFEM解析したところ、図7の左下ののようにDICによく類似したひずみの分布がみられた。

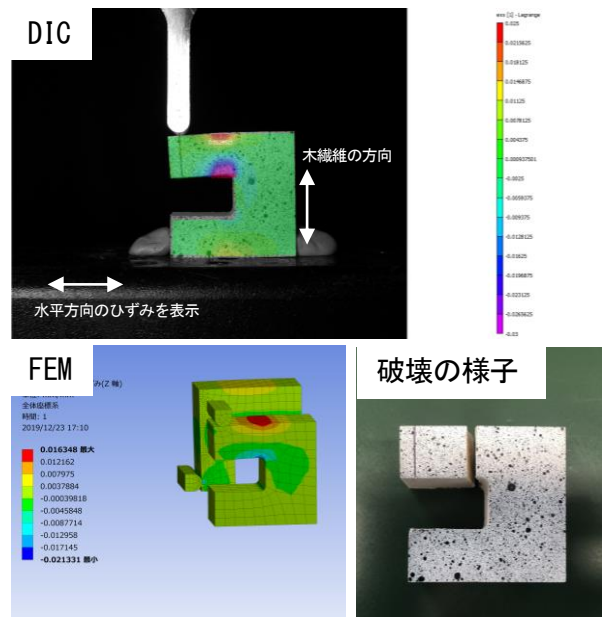


図7 木繊維が鉛直方向の場合の試験結果

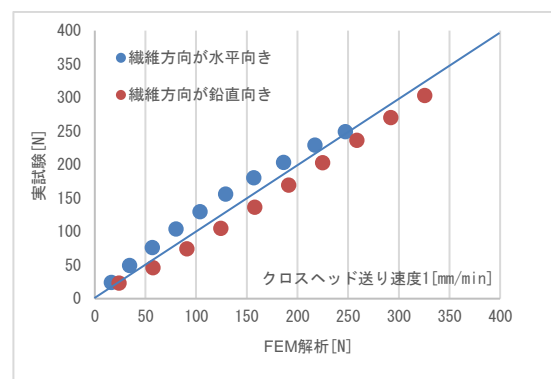


図8 FEM解析と実試験の荷重の比較

さらにFEM解析上で1[mm]の圧縮の計算を10分割して計算し、実試験も10[N]の荷重が加わったところを原点として0.1[mm]間隔で、それぞれ治具にかかる反力を比較した結果を図8に示す。実試験とFEM解析で治具にかかる反力は、加わった荷重の大きさにあまり左右されずに、50[N]以内の差分の範囲で一致してい

ることを確認した。木製品の製品開発においては最終的に製品試験が要求されていることを考慮すると、この差分の範囲で結果が一致していることは、FEM 解析の結果が製品開発の効率化に寄与するに足ると考える。

このように木繊維の方向の異なる試験片では、異なるひずみの分布および破壊挙動を示したが、いずれも適切な材料物性をもとに FEM 解析を行うことで、実試験と類似した解析結果を得られることが分かった。また、木繊維の方向と直交した方向のひずみは木材の割裂に関係があることが実験結果として示された。この知見は木製品の破壊箇所の予測に生かせるため、設計段階での形状のブラッシュアップの工程において非常に有用に活用できると期待される。

3. 2. 履き物の変形挙動の解析

試験品の履物の実試験 (DIC) を行い、図 9 に示す 2 点間 5 組の荷重を加えているときの変位を測定した。その 2 点間 5 組の変位の測定結果を示したのが図 10 であり、試験開始から約 1.5 秒後に④くびれや⑤かかと側の区間に変曲点がみられるが、この理由は、くびれの部分で接触が生じて変形のモードが変化したことによる。試験終了まで片足で全体重を支える 700 [N] を加えたことから、図 10 の試験終了直前にあたる 87 秒の位置を比較位置として各区間の変位を読み取った結果を表 2 に示す。この値をもとに FEM 解析を行った。

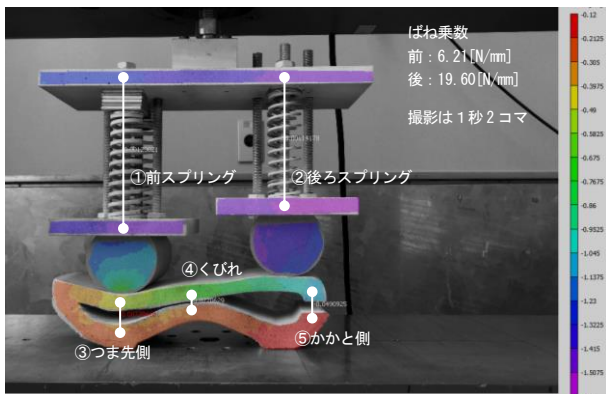


図 9 DIC による変位の測定位置

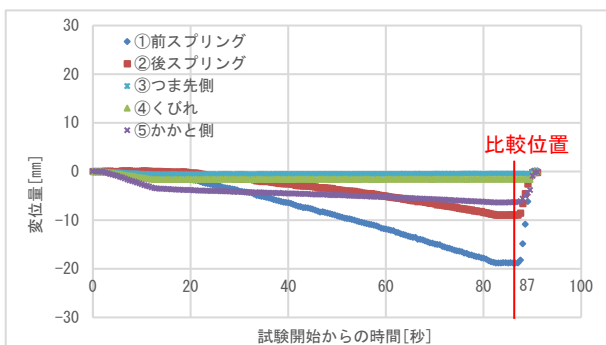


図 10 DIC による 2 点間の変位量

表 2 DIC の結果

2 点間の概要	開始時からの 変化量 [mm]	推定される 荷重 [N]
①前スプリングの圧縮量	-18.82	233.7
②後スプリングの圧縮量	-8.97	351.6
③つま先側	-0.45	/
④くびれ	-1.57	
⑤かかと側	-6.35	

FEM 解析の 3D モデルには 3D スキャナを使用して試験品の履物から取得した点群データを基にサーフェスモデルを作り、さらにリバースエンジニアリングソフトウェアである Geomagic DesignX (3D Systems 社製) に取り込んでデータの修正および簡略化した。その後、データを IGES 形式へ変換したのちに ANSYS へ取り込み解析した。

3. 2. 1. 変位指定の境界条件による計算

FEM 解析の境界条件は、つま先部分の接地面を固定、かかと部分の接地面を変位指定 (鉛直方向に 0 [mm]、他をフリー) とし、くびれ部分とかかと部分は接触問題が生じると思われるので、摩擦なし接触の条件を指定した。また、解析モデルのつま先側の加重位置の変位を 0.45 [mm]、かかと側の加重位置の変位を 6.35 [mm] として試験的に計算したところ、くびれ部分の接触は生じず、実試験と FEM 解析の結果が大きく異なった。この原因は 3D スキャナから得たデータをもとに、サーフェスモデルを作り直す簡略化の処理を行ったため、実物形状と解析モデルの形状に差異が生じてしまったことであると考えられる。特に、くびれ部分の隙間の形状は精密さを要求すると考えられ、2 点で変位を指定する計算では実際の状態を再現することは困難である。

3. 2. 2. 荷重指定の境界条件による計算

3. 2. 1. と同様の拘束の境界条件で、つま先側の加重位置に 233.7 [N]、かかと側の加重位置に 351.6 [N] の荷重を加える条件で計算したところ、くびれ部分の接触が生じて、実試験の結果と同じモードの変形が得られた。また、FEM 解析上の荷重の境界条件に対応する反力は、つま先側 248.4 [N]、かかと側 352.8 [N] となり、DIC から推定した値とよく一致する結果が得られた。さらに、その時の FEM 解析により計算された変位を表示したところ図 11 となり、つま先の負荷位置の変位で約 0.27 [mm]、かかと部分で約 5.1 [mm] の変位と、表 2 に示す DIC の結果とそれぞれ 0.18 [mm]、1.25 [mm] 小さい値が得られたが、木製品の設計に使用することを考慮すると、十分に使用可能な結果と考えられた。また、この FEM 解析の結果の傾向は、つま先と下半分の変位は 1 [mm] 以下となって、上

半分はつま先からかかとにかけて段階的に変位量が大きくなっており、DIC から得られた変位の測定結果(図 1 2) の傾向ともよく類似した。

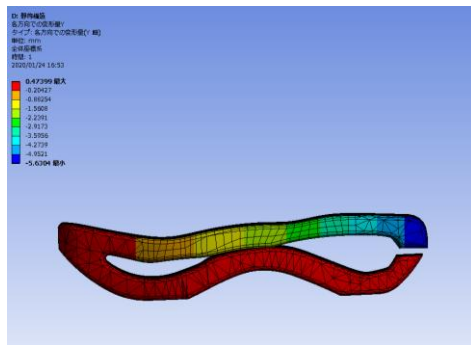


図 1 1 FEM 解析による変位の計算結果

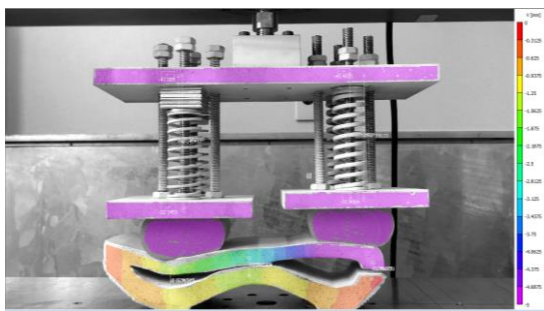


図 1 2 DIC による変位の測定結果

DIC の結果を確認しながら、同じ結果が出るように変形挙動を FEM 解析で再現する検証作業を行った結果、変位による境界条件の指定を行った FEM 解析の結果では、実物形状と解析モデルの差異が原因して、実用に耐えうる一致性で変形挙動を再現することができなかった。

一方で、荷重による境界条件の指定を行った FEM 解析の結果では、解析モデルに少々の差異があっても目的の変形挙動を実用可能な程度まで再現することができた。荷重条件で計算を行って実用的な結果が得られることにはメリットがあり、履く人の体重を想定した上で設計条件を設定することができると考える。また、歩行時の足裏の圧力分布は知られているところなので、この条件を FEM 解析に落とし込むことで設計を行えることが示唆された。

4. まとめ

本事業では木製品について FEM 解析を使用して設計することを検討し、以下の結果が得られた。

① コの字型の小試験片の圧縮・破壊試験を行い、実試験 (DIC) によるひずみ測定の結果と FEM 解析の結果に類似性が得られた。また、この結果から DIC

による木繊維と直交する方向のひずみの集中が木材の割裂に寄与する因子であると直感的に理解できることから、木製品の破壊箇所の予測にも役立つことが分かった。

② 木製の履物の実試験 (DIC) の結果を商用の FEM 解析ソフトに落とし込んで計算を行ったところ、変位による境界条件では、実試験の状態を再現できず、荷重による境界条件では実用に耐える結果が得られた。変位による境界条件が実試験を再現しなかった理由は、用意した解析モデルが実物形状と微妙に差異があったことが原因と考えられた。

参考文献

- 1) 田村功二, 増田稔, 宇京斉一郎. デジタル画像相関法による木材のひずみ分布解析. 可視化情報学会論文集, Vol. 25, No. 9, 2005, p. 57-63.
- 2) 並木博一. デジタル画像相関法を用いた木材の割裂性状に関する研究. 日本工業大学研究報告, 第 45 巻, 第 1 号, 2015, p. 217-220.
- 3) 林産試験場. 木材工業ハンドブック. 丸善株式会社, 第 5 版 4 刷, 1970, p. 163-165.
- 4) 澤田稔. 木材の変形挙動. 「材料」, 第 32 巻, 第 359 号, 1983, p. 2-11.
- 5) 井上勝夫, 木村翔, 前原暁洋, 渡辺秀夫, 松岡明彦. 床歩行時の足裏各部の衝撃力特性. 日本建築学会計画系論文集, 第 477 号, 1995, p. 1-10.