

CAE と評価試験による実践的な訓練教材の開発 Development of Practical Design Technology Course Materials Based on CAE and Evaluation Tests

渡邊 浩志*1 大川 正洋*2 黒木 利記*2

WATANABE Hiroshi OKAWA Masahiro KUROKI Toshinori

1. はじめに

製造業を中心として、Computer Aided Engineering (CAE) の活用範囲は大きく広がっている。CAEは材料力学や流体力学など連続体解析学の分野で発展してきた手法であり、従来は十分な専門教育を積んだエンジニアのみが携わる高度な技術であった。しかし最近では設計や開発の第一線で活躍しているCAEの専門家は、材料力学、流体力学分野ではなく、電気工学や化学工学出身など、連続体解析学の知識は十分とは言えないようなバックグラウンドである場合も多い。これを支えるものが、CAEの汎用コードであり、現在では主要なComputer Aided Design (CAD) にも標準搭載されていて誰もが気軽に使えるツールになっている。

しかしながら、その一方で信頼性の低い解析も増加している。これはCAEに限らず、一般の科学技術計算ソフトやArtificial Intelligence (AI) に共通して、ソフトウェアにはGarbage In, Garbage Out(入力不適切であれば結果も不適切)という特性があり、この対策としてのVerification and Validation(検証と妥当性確認)はアカデミック分野、産業分野を問わず活発に議論されている。

著者らはこの対策として、解析と実験の融合をテーマに教材開発を進めている。本研究では、機械板金による曲げ加工を基盤として、設計、CAE、加工、3点曲げ試験を一貫して学べる教材を開発した。よく知られたパスタブリッジ^①と比較して力学特性が安定した金属材料を用いることにより、誤差要因を軽減した実習が可能になる。

2. 教材開発のための予備試験

構造強度を体験学習する教材としては Fig.1 に示すようなパスタブリッジが有名である。これは材料力学・有

限要素法の専門知識をベースに、身近な材料であるパスタで、パスタブリッジを設計・製作するもので、たとえば直径1.8mm のパスタ 30本をホットボンド3本以内で固定、全重量を45gに制限するなどのルールを定め、耐荷重を競うものである。

素材であるパスタは大量生産されるものでヤング率などの物理特性も個体間のばらつきは少ないが、パスタブリッジ自体は手作業で作成するため製作時の寸法精度や、ボンドでの固定にばらつきが大きいことが知られている^②。このため事前に CAE による性能予測を行う際に誤差要因が多く、解析精度を高めることは困難である。

そこで、本教材では解析精度を高める目的で、金属材料を用いた機械板金による曲げ加工を基盤とした試験体を用いることにした。試験体の一例の概観を Fig.2 に、加工の様子を Fig.3 に示す。加工に用いたプレスブレーキはアマダ社製の FMB3613NT Type II である。材質は電気亜鉛メッキ鋼板(SECC)で、板厚 1.2mm、縦 147mm

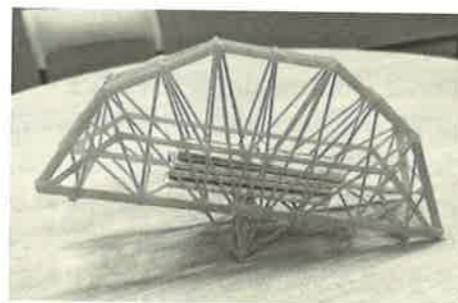


Fig.1 Example of a pasta bridge ^①



Fig.2 Overview of test specimens

*1 株式会社テクスパイア

〒102-0083 東京都千代田区麹町3-3-8 4F

*2 職業能力開発総合大学校 機械専攻

〒187-0035 東京都小平市小川西町2-32-1

×横 230mm のブランク材を用いている。試験体の幅は3点曲げ試験機のジグの大きさから最大70mmとした。したがって作業者は以下の条件のもとに試験体を設計、板金加工することになる。実際の講義に先立ち、同一形状の試験体の試作を行った。熟練した加工技術を有する作業員1名と板金加工の経験のない初学者3名で行っている。試験体の設計条件は以下①~④の通りである。

- ① 材質はSECC、板厚1.2mm
- ② ブランク材の寸法は147mm × 230mm
- ③ 出来上りの幅は最大70mm
- ④ 支点、およびパンチに接触する面(上下面)にエッジが無い形状にする

この条件で作成した試験体を用いて、3点曲げ試験を行う。試験には島津製作所社製のオートグラフ AG-300kN を用い、パンチ半径は5mm 支点間距離は80mm 支点の半径は10mm である。試験体の中央を最大10mm 押し込む試験を行う。この時の様子を Fig.4 に荷重-変位曲線を Fig.5 に示す。初期のパンチ荷重は押し込み量と



Fig.3 Mechanical sheet metal processing of test specimens



Fig.4 Three-point bending test

Fig.5 Experimental load-displacement curve ともに増加していくが、約4mm 押し込んだところでピークを生じ、そのあとは徐々に減少していく。約9mm 押し込むと、試験体が自己接触し、その結果としてパンチ荷重が増加するようになる。4つの試験体の荷重-変位曲線はほぼ一致していた。これにより試験体の形状が確定していれば作業者のスキルには依存せず、再現性高く試験体形状を板金加工できることが確認できた。

3. CAE による3点曲げ試験のシミュレーション

前節で述べた3点曲げ試験をCAEによるシミュレーションを行った。解析には汎用非線形構造解析コード Marc2024.1 (Hexagon 社製) を使用した。以降、材料特性は、Fig.6 に示す単軸引張試験の結果を用いて、多直線近似した等方硬化弾塑性体を用いている。教材としての簡便性のためには、Fig.7 に示すようなシェル要素によるモデルでの解析が有利である。ここでは約1mm ピッチでメッシュを作成している。この時の荷重-変位曲線を Fig.8 に示す。解析結果は実験結果に比べて最大荷重で約2000N 低く、カーブ自体も細かな振動がのっている。この振動はメッシュの大きさに依存しており、試験体コーナーのR部で局所的に曲率が反転するような飛び移り座屈に近い極端な変形が生じるためであることが分かった。しかし、解析に使用したメッシュのピッチは板厚よりも小さく、シェル要素を用いる限りメッシュを細分化しても精度の向上は期待できない。

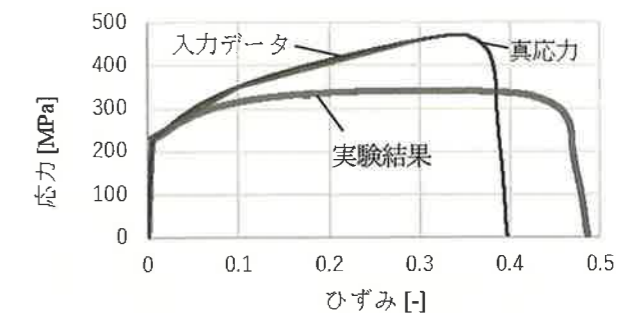


Fig.6 Stress-strain curve from uniaxial tensile test



Fig.7 Shell element model

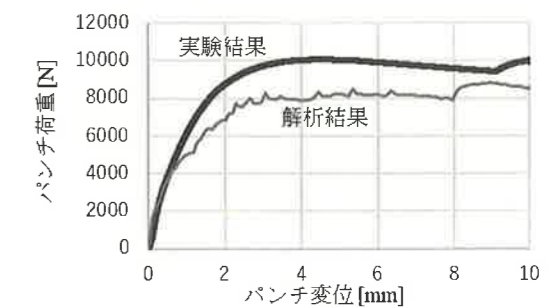


Fig.8 Load-displacement curve (shell element analysis)

最大荷重が一致しない原因を解明するために、Fig. 9 に示すような機械板金による90°のV曲げ加工のシミュレーションを行った。パンチ径は1.3mm、V幅は8mmとした。解析にはソリッド要素を用い、板厚方向に10分割している。平板からの曲げ変形に伴い局所的に相当塑性ひずみが0.4を超える箇所(赤い部分)があった。これはFig. 6 に示す単軸引張試験においてはネッキングを生じているような大きな塑性ひずみを生じる領域であり、解析の精度に大きな影響があることが確認できた。この結果を反映させるために、ソリッド要素により0.3mmピッチでメッシュを作成したモデル(板厚方向4層)により再解析をおこなった結果、Fig. 10 に示すように最も変形が大ききところで、相当塑性ひずみが1.0を超える箇所もあることが判明した。そこで今回使用するような機械板金による曲げ加工された試験片は、加工硬化の影響が無視できないと考え、試験体のR部に相当するFig. 11において灰色で示す部分の応力-ひずみ曲線(SSカーブ)をFig. 6 に示す入力データを相当塑性ひずみが0.4以降に延長すると、0.4で515MPa、1.0で845MPaでなることを考慮して、改めて塑性ひずみが0で515MPa、0.6で845MPaとなるようなSSカーブに置き換え影響を見ることにした。Fig. 12 に荷重-変位曲線を示す。局所的な加工硬化を考慮することにより、ピーク荷重などの再現性もよくなることが確認できた。最後に同様の解析をシェル要素で行った結果をFig. 13 に示す。ピーク荷重の再現性はソリッド要素と比較すると低いが、押し込み量で1mm強の荷重-変位曲線の立ち上がりの再現性は改善したことが確認できる。

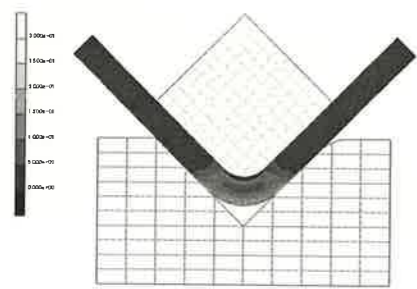


Fig.9 Equivalent plastic strain of V-bending simulation

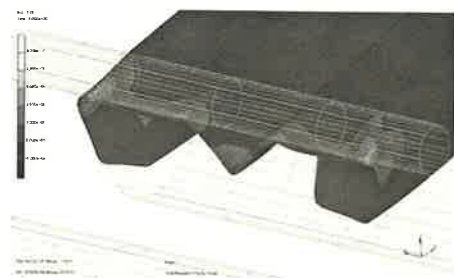


Fig.10 Equivalent plastic strain (solid element model)

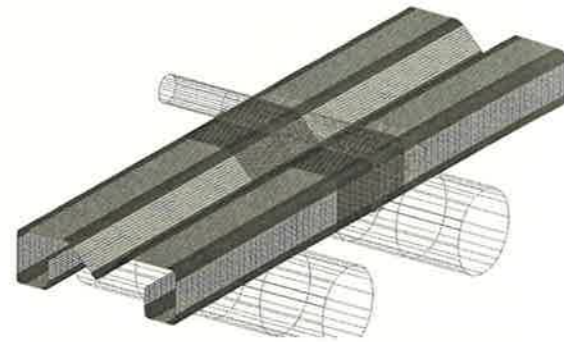


Fig.11 Work hardening area

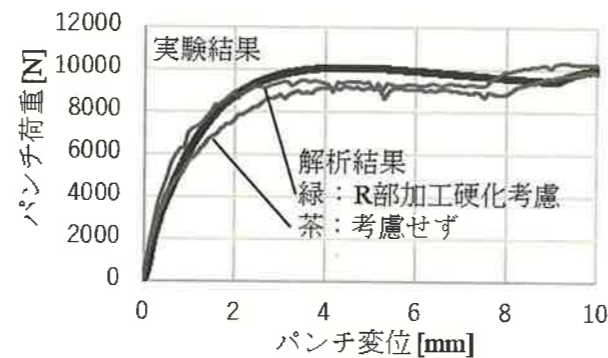


Fig.12 Load-displacement curve (solid element analysis considering work hardening)

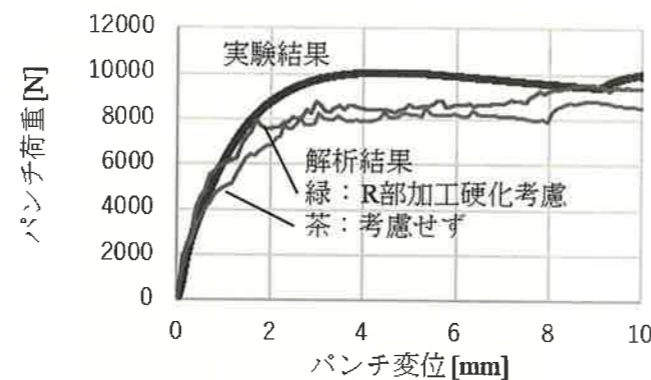


Fig.13 Load-displacement curve (solid element analysis considering work hardening)

4. 実習教材の概要と実施

本実習教材は、最初に CAE の概要について学んだあと、例題として Fig.2 に示す断面形状を有する試験体の有限要素解析を行う。次に、前述の3点曲げ試験で約4mm押し込んだところで現れたピーク荷重が高くなるような断面形状を設計し、有限要素解析によって性能を予測する。解析によって得られた知見に基づきさらなる性能向上が可能な場合は設計を変更する。ただし設計変更は、

機械板金で加工できることを確認しながら進める必要がある。実際に試験体を製作し、ピークパンチ荷重の高さと、事前に予測した有限要素法の結果と一致しているかを評価項目とする。

2025年度に実施した総括を以下にまとめる。

- CAE に初めて取り組もうとする指導員が殆どであった。そのため理論編は、レベル的に難しい(CADのみ習得した方の場合、微分積分、行列演算に無理がある)。
- CAE の実習については、最初、Marc で実施したが初めて操作する人ばかりで、途中でSolidWorks に切り替えた。CAD 図の作成に終わったケースも多い。
- 試験体のバリエーションが豊富で、作成が難しいものが多く、最初はスムーズに行かず、試行錯誤になった。最終的に機械板金で作成できることは確認できた。
- 3点曲げ試験については、パンチと試験体の摩擦係数が不明なため CAE による予測と異なる結果になる場合もあった。

次年度に向けて改善点を以下にまとめる。

- 実験の段取りの改善はできる、特に、実験対象物をもう少し簡単なものにするということは選択肢の一つである。
- 理論については、理解できなくても基礎に触れる意義はある一方、習熟度別教材(入門/基礎)の段階化が必要である。
- 解析がスムーズにできるような手順、自動化を考える必要がある。例えば CAD でサーフェスを作成した後処理の自動化が考えられる。

受講者による設計例を紹介する。事前検討では支点間距離は80mmとしていたが、ジグの強度の問題から、今回の実習では120mmとしている。

設計例1は事前検討と断面形状が近似しており、傾向が一致していたモデルである。Fig. 14 に断面図、Fig. 15 に荷重変位曲線、Fig. 16 に実験の様子、Fig. 17 に解析による変形予測図を示す。

これに対して設計例2は梁としての高さを確保するため開断面になっており、解析では開断面が開くが、実験では開かない結果となった。また、板金加工が難しい形状であり、成形品の直角の精度が確保できない。これが初期不整となり、実験と解析の結果に差を生じる。Fig. 18 に断面図、Fig. 19 に荷重変位曲線、Fig. 20 に試験体の変形の様子、Fig. 21 に解析による変形図を示す。

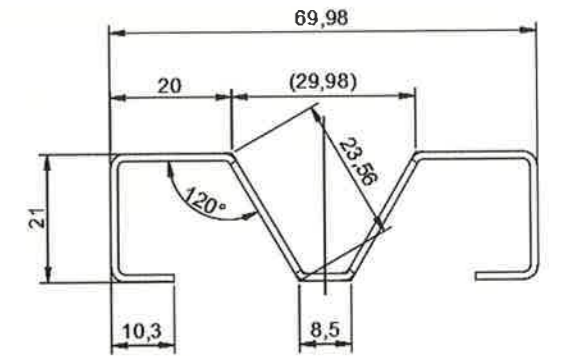


Fig.14 Sectional profile of design example 1

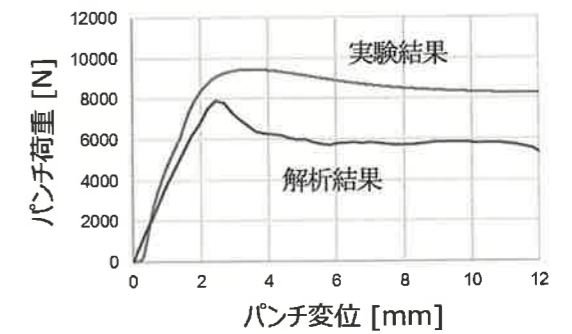


Fig.15 Load-displacement curve (design example 1)

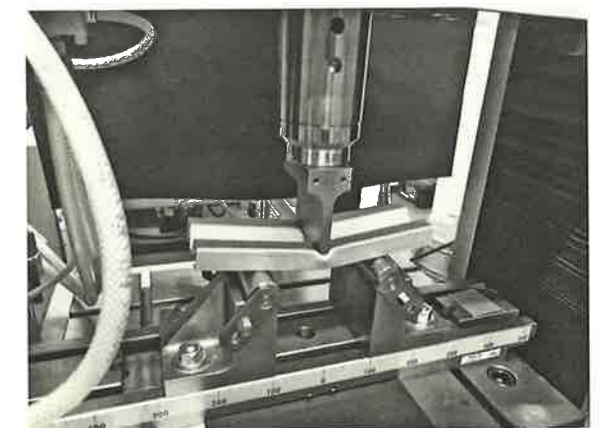


Fig.16 Three-point bending test

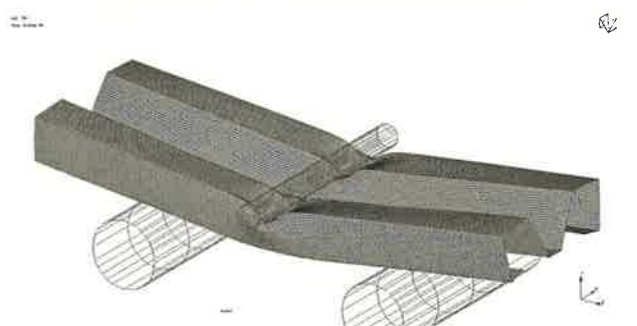


Fig.17 FEM-predicted deformation

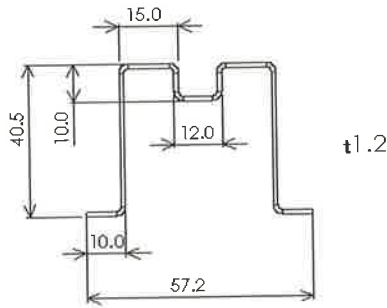


Fig.18 Sectional profile of design example 2

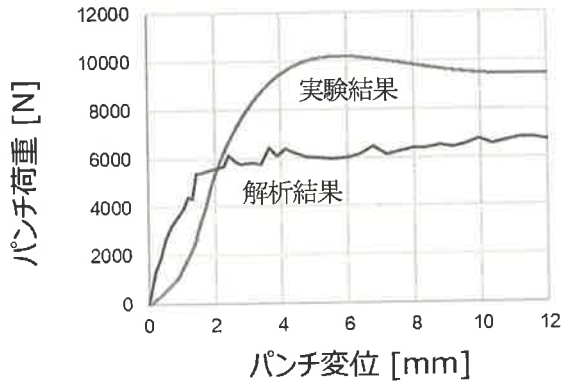


Fig.19 Load-displacement curve (design example 2)



Fig.20 Deformation of test piece (design example 2)

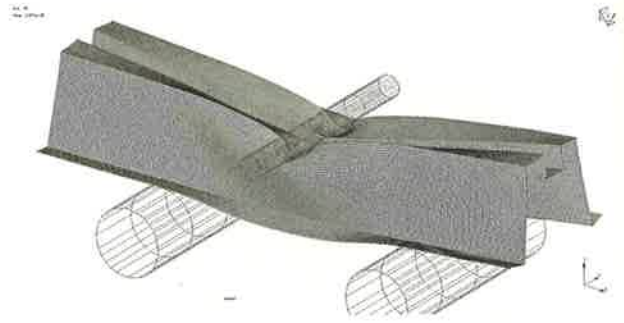


Fig.21 Three-point bending test (design example 2)

5. まとめ

本稿では、機械板金による曲げ加工を基盤として、設計、CAE、加工、3点曲げ試験を一貫して学べる実習教材開発について報告した。よく知られたパスタブリッジと比較して力学特性が安定した金属材料を用いることにより、誤差要因を軽減した実習が可能になる。この結果、解析結果と実験結果との比較において高い再現性が得られ、信頼性の高い教育が可能となった。今後は、まず技能・技術者の実践研修の教材の有効性を検証するとともに、大学・高専・職業訓練校などの実習教材として活用できるようにブラッシュアップしていく予定である。

参考文献

- (1) 東京大学工学部機械工学科泉・波田野・榎間研究室ウェブサイト「パスタブリッジコンテスト」
<https://www.fml.t.u-tokyo.ac.jp/pasta/> (参照日 2025年7月4日)
- (2) 東京大学工学部機械工学科泉教授、私信
 (原稿受付 2025年11月18日)