

CAE と評価試験による実践的な演習教材の開発について

Development of practical design course materials based on CAE and evaluation tests

○正 渡邊 浩志^{*1}, 大川 正洋^{*2}, 黒木 利記^{*2}Hiroshi WATANABE^{*1}, Masahiro OKAWA^{*2}, Toshinori KUROKI^{*2}^{*1} 株式会社テクスパイア Techspire Co., Ltd^{*2} 職業能力開発総合大学校 The Polytechnic University of Japan

The application of Computer-Aided Engineering (CAE) is expanding rapidly; however, the number of unreliable analyses is also on the rise. To address this issue, the authors are developing educational materials that integrate analysis and experimentation. In this study, we created instructional resources that allow students to learn design, CAE, manufacturing, and three-point bending tests in a seamless manner, using sheet metal bending as the core theme. By employing metal materials with more stable mechanical properties than the well-known pasta bridge, the training can be conducted with fewer sources of error, enabling more practical and reliable learning experiences.

Key Words : Educational materials, Experimental verification, Sheet metal bending, Three-point bending tests, CAE

1. 結 言

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 という特性があり、この対策としての Verification and Validation 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, 板厚 1.2mm) で 147mm × 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 出来上がりの幅は最大 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-300kNX 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員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。

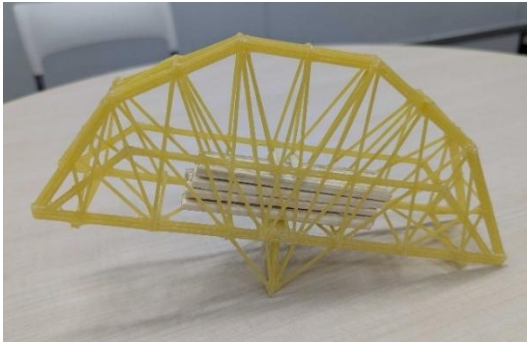


Fig.1 Example of a pasta bridge⁽¹⁾

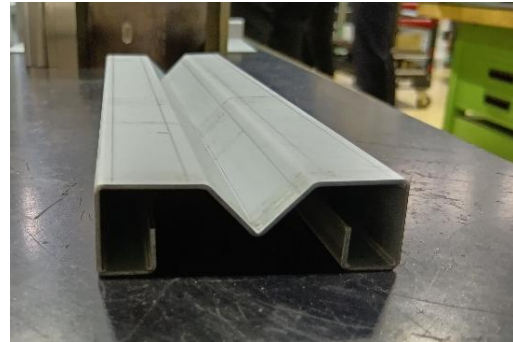


Fig.2 Overview of test specimens



Fig. 3 Mechanical sheet metal processing of test specimens

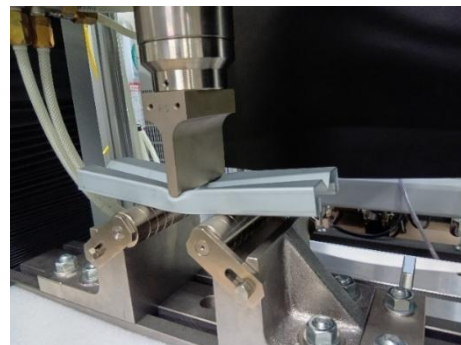


Fig.4 Three-point bending test

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いところで、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 において緑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、0.6 で 845MPa と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、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。

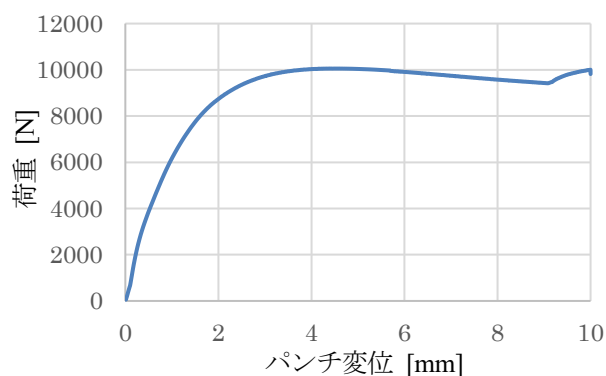


Fig.5 Experimental load-displacement curve

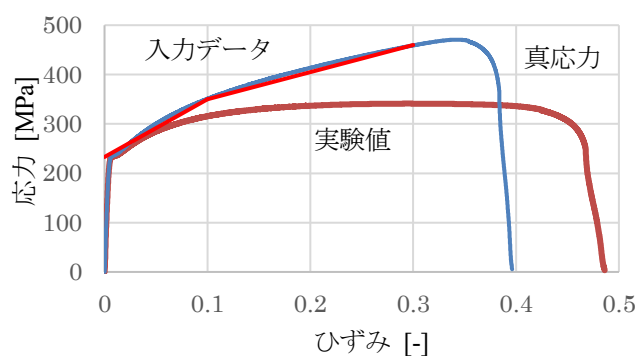


Fig.6 Stress-strain curve from uniaxial tensile test

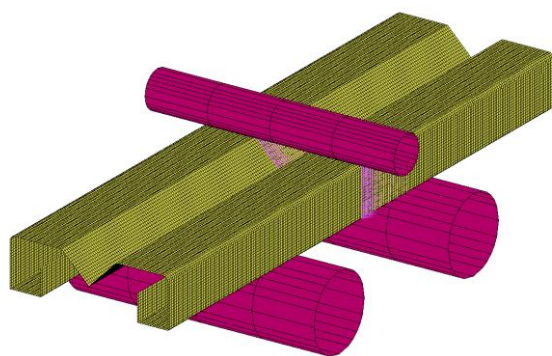


Fig.7 Shell element model

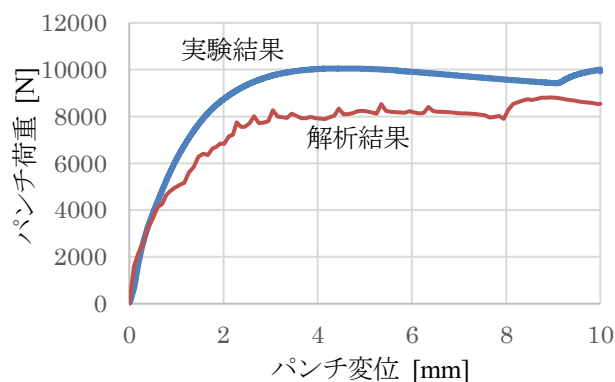


Fig.8 Load-displacement curve (shell element analysis)

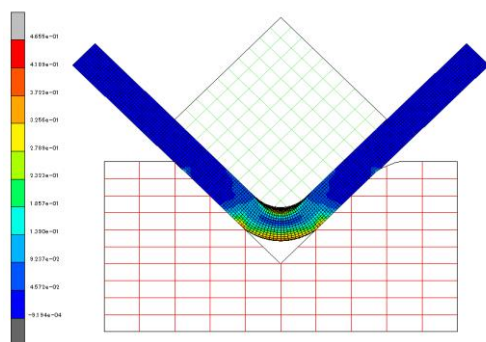


Fig.9 Equivalent plastic strain of V-bending simulation

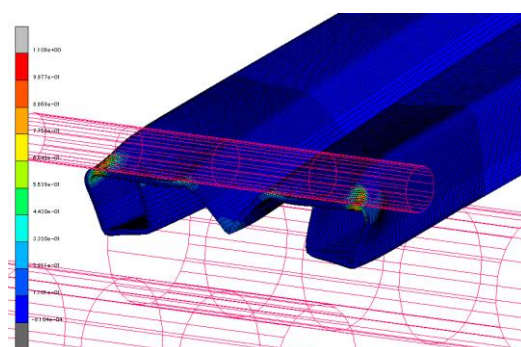


Fig.10 Equivalent plastic strain (solid element model)

4. 実習教材の概要

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。

5. 結 語

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実習教材を開発した。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。

文 献

- (1) 東京大学工学部機械工学科泉・波田野・榊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

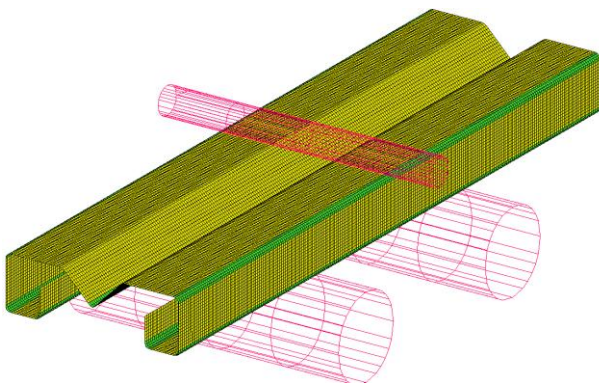


Fig.11 Work hardening area

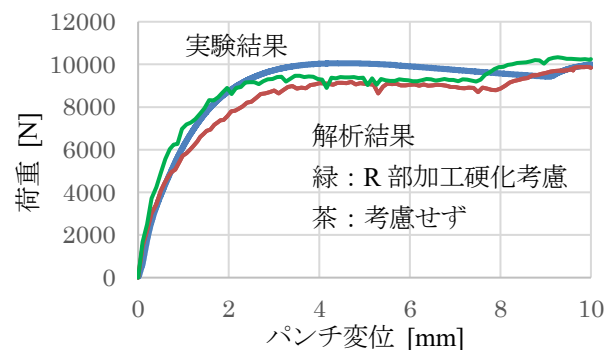


Fig.12 Load-displacement curve (solid element analysis considering work hardening)

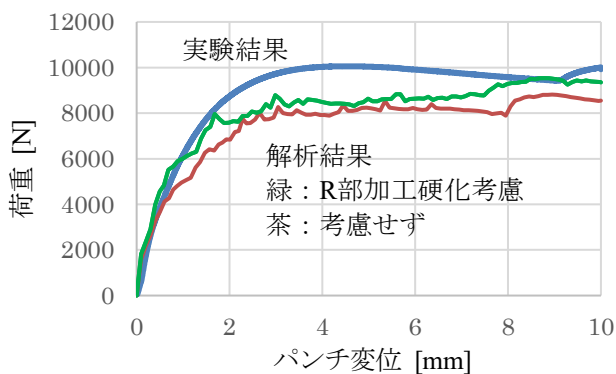


Fig.13 Load-displacement curve (solid element analysis considering work hardening)