

材料強度を身近に感じる実験・実習への取り組み

鶴 秀登*・徳田 つる代**・中 哲夫***・

中山 恭秀*・柏原 一仁****・山下 敏久**

An Approach to the Experiment and Workshop Practice to be Familiar with Strength and Fracture of Materials

Hideto Tsuru*, Tsuruyo Tokuda**, Tetsuo Naka***, Yasuhide Nakayama*,

Kazuhito Kashihara **** and Toshihisa Yamashita**

Abstract

It is important to do experiments and workshop practices for engineering and to learn the specialized subjects. And also it is necessary for students to have interests and ideas as to how to do the task throughout experiment and practice. But they have no time to understand the subject enough, and no idea as to how to do the task in rapid sequence. An idea about how to improve the aim of experiments and practices occurs.

This report is concerned with a creative manufacturing education for lower grade to motivate students to learn strength and fracture of materials. Problem-Based Learning subject as described above will give an interest in engineering and they will have a good idea.

1. 緒言

高専教育の特徴は、創造性豊かなものづくりのできる実践的技術者を養成することにある。その過程において機械加工などの技能を習得することもまた重要である。電子機械工学科では電気・電子、制御、情報、機械系など多くの実験・実習テーマを準備するため、時間的な制約から各テーマにおける学生の取り組みは受け身になりがちであり、考えて事に当たるとか工夫を凝らすなど、創造性を養うには乏しい時間設定のように思われる。また、座学との結び付きを感じられないまま実験・実習を終了してしまい、専門教科学習へのモチベーション向上に繋がってきていないように感じられる。

そこで本報告では、教科に興味をもたせ、その過程において創造力を求めるような実験・実習について検討する。具体的には材料の強さに興味をもたせ、力学、材料、設計関連の学習に意義を感じさせる実

験・実習を目指すことを試みる。実験・実習内容は、板の引張試験と単純支持はりの3点曲げによる破断実験およびNC工作機械のためのCAD/CAMと関連の数値シミュレーション(CAE)である。そして、これらを遂行する過程の試行錯誤が創造性教育になると考える。

2. 実験・実習の内容

2.1 目的

自動車の車体外板のように薄くて広い板材を用いる場合、板曲げによる変形を抑えるため、面剛性(曲げ剛性)を向上させる目的で車体外板の内側に補強材を取り付ける。そのような補強材の曲げ剛性と曲げ強さは定量的に評価されている。そこで補強材の曲げをモデル化して実験・実習で取り扱い、補強材の長さや断面形状が破断時の荷重に及ぼす影響について検討する。併行してCAE技術を用い、補強材

* 電子機械工学科 ** 技術支援センター

*** 商船学科 **** 専攻科生産システム工学専攻

の強度をシミュレーションし実験結果と比較する。

具体的には、単純支持はりの3点曲げ試験を行い、はり材料が破断する荷重を求める。実験の手順を考え、結果の予測を行うことからスタートし、実験がうまくいった時の理論的解釈、そして実験がうまくいかない時の工夫を求め、実験・実習の目的とする。

2.2 試験片

図1(a)によく用いられる補強材の形状を示す。この形状を同じ板幅の板から形状比の異なるものを作り出し、図2に示す3点曲げによる強度評価を行うことが最終目標である。今回は予備実験として、簡単な図1(b)の形状(溝形)を用いる。そして、このような試験片を図1(c)のアルミニウム押出角パイプ材10×10(A6063S-T5)から作製する。また、この角パイプ材の機械的性質(弾塑性挙動)を調べるため、図3に示す試験片を用いて引張試験も行う。これらの試験片の作製にはNC工作機械を用いる。

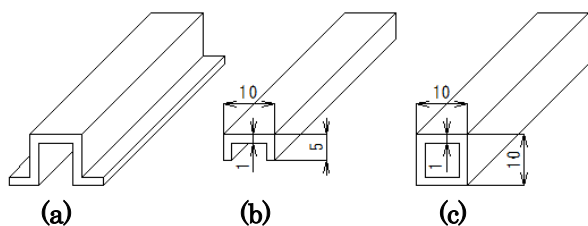


図1 試験片の形状

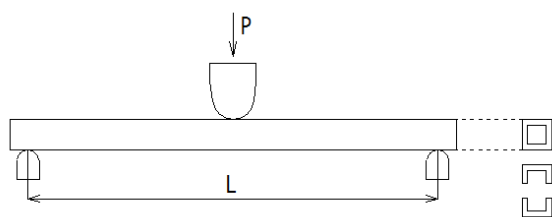


図2 3点曲げ試験

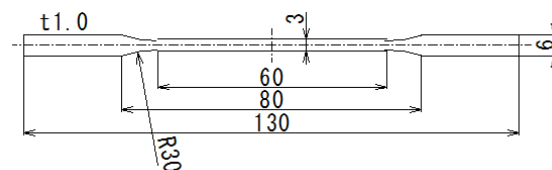


図3 引張試験片寸法

2.3 手順と結果

実験・実習の内容を手順ごとに示し、簡単にその結果を述べる。

- 1) CAD/CAMあるいは直接NC工作機械へのプログラム入力により、ワイヤカット放電加工機で図1(c)の角パイプ材から図3に示す引張試験片を作製した。なお、この形状にしたのは引張試験機(INSTRON3343)の荷重容量が1000Nのためである。
- 2) 作製した引張試験片を卓上引張試験機に取り付け、実験を行った。引張試験から得られた公称応力と公称ひずみ(基準長さは平行部の60mm)の関係を図4に示す。この関係から、縦弾性係数=16GPa、降伏強さ=185MPaおよび引張強さ=204MPaが得られた。参考文献⁴⁾によると実験に用いたアルミニウム押出材(A6063S-T5)の機械的性質は、縦弾性係数=70GPa、引張強さ=190MPaである。縦弾性係数に大きな差が生じている(課題1)。
- 3) ワイヤカット放電加工機を用いて、図1(c)の角パイプ材から図1(b)の溝形試験片を作製した。
- 4) まず、曲げによる破断試験を図1(c)の角パイプ材を用い、曲げ試験機(TENSILON RTF-2430-TACT)で行った。この試験片形状は数値シミュレーションに頼ることなく応力計算ができ、図2のスパンLの与え方で破断力が予測できるため予備実験に用いた。L=260mmにおける荷重とたわみの関係を図5に□260で示す。急激な荷重の低下は図6(a)に示す破断によるもので、その現象を予測通りに確認することができた(課題2)。
- 5) 次に、作製した図1(b)の溝形試験片の3点曲げ試験を同じL=260mmで行った。その際、溝形のオープンな面を上下にして実験した。Π字に置いた場合と∟字に置いた場合の荷重-たわみ線図を図5にΠ260、∟260で示し、実験後の試験片を図6(b)、(c)に示す。線図に急激な変化はなく、図6からも破断は確認できない。L=260mmの図1(b)溝形試験片は破断しなかった(課題3)。
- 6) 図1(b)の試験片を3点曲げで破断させることを試みた。破断しない理由を実験方法にあると考え、試験片長さおよび荷重点の局所変形を避ける負荷方法について検討した。その実験後の試験片を図7、図8に、図5に荷重-たわみ関係をΠ100、∟100、∟100治具、∟75ゴムの記号で示す。また、図9(a)、(b)は荷重点に工夫を与えて実験している様子である(課題4)。

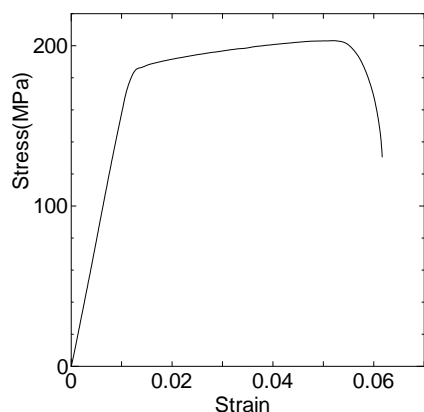


図4 公称応力-公称ひずみ線図

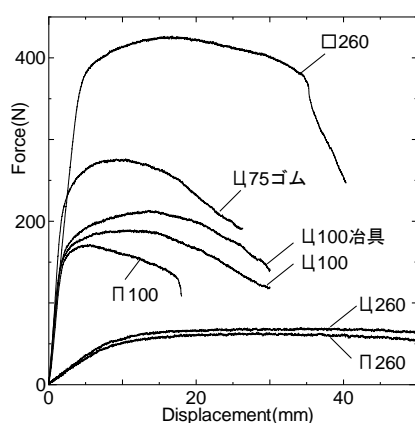
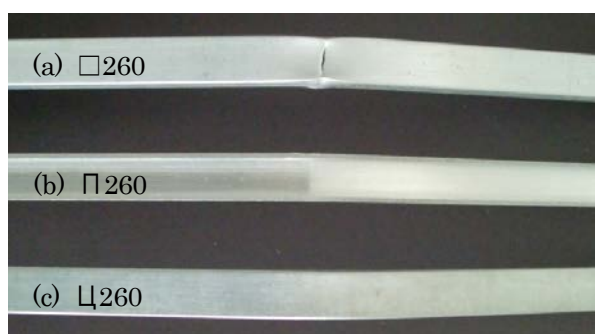
図5 荷重-たわみ線図
(記号の後の数字はスパンLを示す)

図6 実験後の試験片下側(引張側) (L=260mm)



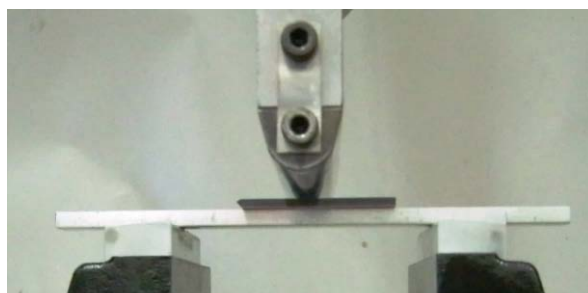
図7 実験後の溝形試験片 (Π字 L=100mm)



図8 実験後の溝形試験片下側(引張側) (U字)



(a) 治具を用いた負荷



(b) ゴムを当てた負荷

図9 局所的な変形を避けるための工夫 (U字)

2.4 強度評価の基礎

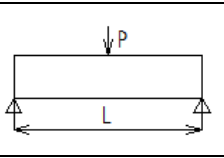



この実験・実習は、具体的な数値の取り扱いと現象を見せることによって、専門教科に興味をもたせ、理解を手助けすることが目的である。そのため、実験を行うにあたって実験の予測をすることは重要である。また、実験結果を基礎知識によって考察することも必要である。専門教科では、静的荷重による強度評価は、材料、断面形状と負荷の種類で決定できることを学ぶ。アルミニウム押出材の曲げの実験には、曲げモーメントと断面係数が強度評価上必要となる。具体的な評価法を以下に示す。

3点曲げ試験を行った試験片の強度予測は、断面形状の断面係数 Z を求めることで行える。この材料の降伏強さ 185MPa を用い、 $L=260\text{mm}$ における降

伏荷重 P_Y (荷重 P によって生じる最大応力が降伏強さになる時の荷重) は, 図 1 (b), (c) に示す形状の断面係数を用いて表 1 のように予測できる。なお, 付録 1 に断面係数の計算法を示す。また一般的な断面形状に対しては, CAE 技術を用いて予測可能で, 図 1 (b), (c) の形状について CAE を用いたはり中央断面の応力分布を図 1 0 に示す。そしてこの結果から得られた降伏荷重 P_Y も図中に示す。表 1 とほぼ同じ結果が得られていることがわかる。さらに付録 2 に, 図 1 (a) のはりを CAE で計算した結果も示す。なお, 破断荷重 P_{cr} は近似的に弾完全塑性体の長方形断面を用いた $1.5P_Y$ とした [付録 3]。

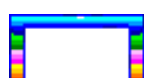
実験結果は角パイプの場合, 図 5 に示すように $L=260\text{mm}$ で $P_{cr}=425\text{N}$ である。表 1 の予測は良い値を与えている。一方, 計算予測では小さい荷重で破断するはずの図 1 (b) 溝形については, 図 5 に示すように $L=260\text{mm}$ の 3 点曲げ実験では破断現象がとらえられなかった。そこでたわみを小さくすることを考え, スパン $L=100\text{mm}$ にして実験し, Π 字に置いた実験については破断を確認でき (図 7), 図 5 に示すように $P_{cr}=170\text{N}$ を得た。これは, $L=260\text{mm}$ における $P_{cr}=170/2.6=65.4\text{N}$ に相当し, 表 1 の予測はやや小さい値を与えている。実験精度と予測精度には, まだ多くの課題がある。たとえば, 予測のため図 4 の応力-ひずみ関係を弾完全塑性体と仮定し, そして $P_{cr}=1.5P_Y$ と評価していることがあげられる。このように, 予測が実験結果とやや大きい誤差を生じるのは基礎知識の適用だけでは止むを得ない。

表 1 断面係数 (図 1) による破断荷重の予測 ($L=260\text{mm}$)

			
降伏荷重 $P_Y(\text{N})$	280.1	33.0	69.4
破断荷重 $P_{cr}(\text{N})$	420.1	49.5	104.1



$P_Y=277.5\text{N}$



$P_Y=32.8\text{N}$



$P_Y=67.9\text{N}$

図 1 0 CAE による応力解析と降伏荷重 P_Y

3. 学生の取り組む課題

3. 1 技能課題

図 1 (c) の角パイプ材の機械的性質を引張試験で求めるため, 断面形状が幅 10mm , 高さ 10mm , 板厚 1mm の角パイプから試験片を切り出す。図 3 に示すように試験片の平行部の幅が 3mm と狭く, しかも平行部長さを長くしたためワイヤカット放電加工の終盤で試験片が水流で暴れ, 試験片表面とワイヤが通電して傷が入った。それを避けるためには, ワイヤカット放電加工機の切り残し・切り落とし機能を使って加工する技能が必要となる。

また, 曲げ試験に用いる溝形試験片は, 角パイプ材から長さ $L=300\text{mm}$ 同じ高さに切り出す必要がある。そのため, ワイヤカット放電加工機への材料の取り付けには, 角度補正機能を用いて対応しなければならない。このような機械加工における工夫がなければ, 実験はうまくいかない。(課題 1) では, 結果に問題が生じた場合, 機械加工も含めて検討することを求めた。学生が機械を使って試験片を作製することは, 機械加工の技能を身につけるだけでなく, 使用する立場に立ったものづくりの大切さを学ぶことになる。

3. 2 技術課題

3 点曲げ試験における破断荷重の予測は, 与えられたスパン L と断面係数 Z を求めることで近似的に行えることを 2. 4 項で示した。(課題 2) として予測のための基礎理論の学習と具体的な数値の算出を求めた。ここでは $L=260\text{mm}$ の予測をたて, そのスパン L で破断実験を行った。すると角パイプは, 予測通りの破断荷重で破断が生じたが, 溝形で Π 字 (図 6 (b)) および Γ 字 (図 6 (c)) に置いた場合は, いずれも破断には到らなかった。そこで (課題 3) として, 溝形のはりを破断させる方法を取り上げた。実験を検証すると, 予測破断荷重近くでたわみが大きくなり, 支持点で試験片が滑って負荷が増大しないまま変形が進んだ。大きいたわみを避けて実験しなければならないことに気づき, 対策の 1 つとして, 溝形のスパンを角パイプ $L=260\text{mm}$ で得られたたわみの最大値と同程度になるように決め, そのスパンで実験する。スパン L は次式(1), (2)を用いて約 $L=100\text{mm}$ と算出できる。なお式(1)は中央に集中荷重を受ける単純支持はりの中央の最大たわみ δ の式, 式(2)は中央に生じる曲げ応力 σ_b の式である。

$$\delta = PL^3/48EI \quad (1)$$

$$\sigma_b = PL/4Z \quad (2)$$

ここで、 P ははり中央の集中荷重、 L は単純支持長さ (スパン)、 E は縦弾性係数、 I は断面二次モーメント、 Z は断面係数である。

溝形を Π 字 $L=100\text{mm}$ で実験を行い、その結果を図 5 に $\Pi 100$ で示し、図 7 に試験片を示す。図 5 で破断による荷重の急激な低下が見られ、図 7 からはき裂を確認できる。破断実験がうまくいったことがわかる。しかし、 \sqcup 字 $L=100\text{mm}$ については、図 8 (a) に示すように荷重点で座屈および湾曲が生じ、破断できなかつた。この実験については、(課題 4) として学生の創意工夫を求める。例として、まず荷重点に治具を置いて実験を試みた。治具はワイヤカット放電加工機で鉄板を加工して作製した。治具を置くと治具の幅分が分布荷重となるため、その影響も予測した。ここで用いた治具の幅がスパンの 8% の場合、最大曲げモーメントは集中荷重による最大曲げモーメントの 96% となり、分布荷重の影響は小さい。そして治具を用いた曲げ試験を行ったが、図 8 (b) に示すように、治具がある部分と無い部分の境で湾曲が生じた。次に $L=75\text{mm}$ にして荷重点にゴムを置いて実験した。図 8 (c) に示すように中央から少し離れたところで外側に大きく湾曲し、やはり破断には到らなかつた。なお図 9 (a), (b) に負荷部の工夫の様子を示す。このように工夫は色々考えられるが、破断させるといふ課題を与えることで対処法を考え、基礎知識が身に付き、また議論の中で材料強度の理解も深まり、興味もでてくると考えられる。

4. 結 言

「この棒の曲げ強度を評価せよ」といふ課題を与え、取り組む過程が創造性を育む教育となるような実験・実習を提案した。この実験・実習では実験の手順を考え、結果の予測を行うことからスタートし、実験がうまくいった時の理論的解釈、そして実験がうまくいかない時の工夫を求める。具体的には、はりの 3 点曲げという比較的簡単な実験・実習であるが、材料強度に興味をもたせ、材料強度関連科目の理解を手助けするには良いテーマと考える。実験がうまくいくように意見を戦わすことで考える力や問題解決能力が身に付き、破断の現象や CAE による解析結果を見ることで材料強度に興味をもち、材料強度関連科目を学ぶモチベーション向上につながる。複雑な要素が加わるこの実験・実習を遂行すること

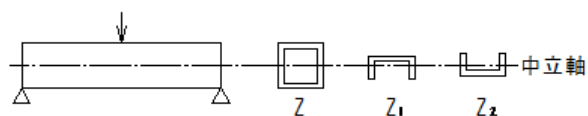
で、専門教科の理論が応用できる程度に理解が深まると考える。また試験片の作製における技能の向上は、使用する立場に立ったものづくりとして意義がある。

参考文献

- [1] 神尾彰彦: アルミニウム新時代, 88-89, (1993)
[2] 大西清: JIS にもとづく機械設計製図便覧 (第 10 版), 21-23, (2001)

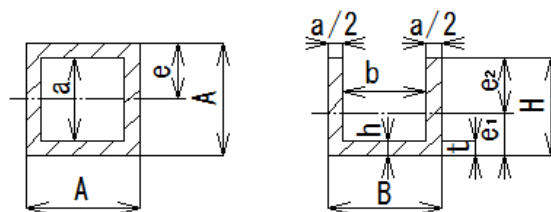
付録 1 曲げを受けるはりの断面係数

3 点曲げ試験を行った試験片の形状および断面二次モーメント I と断面係数 Z の式を付図 1 と付表 1 に示す。



付図 1 はりの断面形状

付表 1 断面二次モーメント, 断面係数^[2]



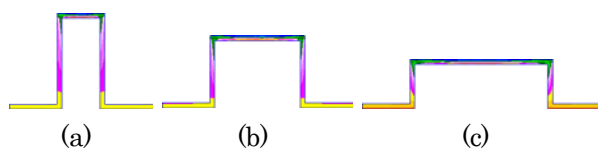
角パイプ

溝形

	図心の位置 e	断面二次 モーメント I	断面係数 Z
角パイプ	$e = \frac{A}{2}$	$\frac{A^4 - a^4}{12}$	$\frac{1}{6} \left(\frac{A^4 - a^4}{A} \right)$
溝形	$e_2 = H - e_1$ $e_1 = \frac{1}{2} \times \frac{aH^2 + bt^2}{aH + bt}$	$\frac{1}{3} (Be_1^3 - bh^3 + ae_2^3)$	$Z_1 = \frac{I}{e_1}$ $Z_2 = \frac{I}{e_2}$

付録2 ハット形断面 (図1(a)) の曲げ

同一幅の板をハット形に折り曲げた3種類の形状について、CAEによる応力解析結果を付図2に示す。また専攻科の授業「数値解析特論」で行った簡易的な曲げ試験の様子を付図3、付図4に示す。本授業では、断面係数について説明した後、学生に同一幅の厚紙を配布した。学生には、「曲げ強度ができるだけ大きくなるような比率を考えてハット形の形状に折り曲げなさい」と指示し、紙を折り曲げてもらった。付図3に示すように、紙を折り曲げて作製した試験片を両端支持になるように置き、はりの中央に上からプッシュプルゲージで負荷を与えて実験した。付図4に高さ、フラット部の幅、フランジ幅の比率がそれぞれ異なる試験片を示す。なお、実験による曲げ強度は図の左側の方が大きい。また高さを高くして座屈が生じた場合があったが、座屈荷重は求めている。座屈も強度評価上重要である。



付図2 CAEによる応力解析
(最大応力は(a)<(b)<(c)となる)



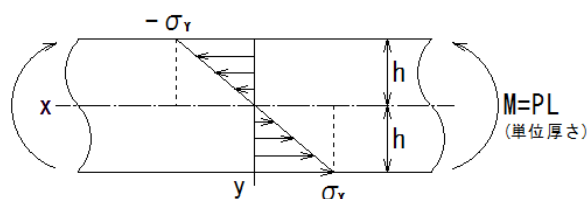
付図3 実験風景



付図4 実験後の試験片
(左側の方が受けもつ負荷荷重が大きい)

付録3 全断面降伏

弾完全塑性体である長方形断面をもつ単位厚さの板の曲げにおいて、全断面降伏における荷重を破断荷重 P_{cr} とすると、 P_{cr} は最大応力が降伏応力になった時の荷重 (降伏荷重) P_Y の 1.5 倍となる。なお、このモデルを角パイプ (図1) に適用すると $P_{cr}=1.24P_Y$ となる。



付図5 曲げ応力分布の模式図

$$\sigma_y = \frac{M_Y}{Z} = \frac{M_Y}{\frac{1 \times 2h^2}{6}} = \frac{3M_Y}{2h^2}$$

$$M_{cr} = \int_{-h}^h \sigma_Y y dy = -\sigma_Y \left[\frac{y^2}{2} \right]_{-h}^0 + \sigma_Y \left[\frac{y^2}{2} \right]_0^h$$

$$= \frac{\sigma_Y}{2} h^2 + \sigma_Y \frac{h^2}{2} = \sigma_Y h^2 = \frac{3M_Y}{2h^2} \times h^2 = \frac{3}{2} M_Y$$

$$\therefore P_{cr} = 1.5P_Y$$