

〔技術報告〕

構造力学実験教材の開発

(梁のたわみと強度)

上原 修一^{*1}

Development of Laboratory Works in Structural Mechanics (Deflection and Bending Strength of Beams)

Shuichi UEHARA^{*1}

Abstract

For architecture students, structural mechanics can be a challenging but necessary subject, which they must learn to pass the test as first or second-class architects in Japan. In our institute's department of Architecture and Building Services Engineering, compulsory subjects of structural mechanics with six credits and elective subjects with six credits are assigned. However, many students need help understanding even the basic theory of structural mechanics. Therefore, an assignment on structural mechanics was created in the subject of Architectural Equipment Laboratory in the first semester for juniors. In the project, four groups of four or five students were given 360 min to work on a primary assignment on structural mechanics using a wooden rod. The study stirred the interest and attention of students, and feedback in their reports was appreciative; thus, this assignment can be considered helpful in teaching structural mechanics.

Key Words: Structural mechanics, Beam, Deflection, Bending strength, Area moment of inertia

1. はじめに

建築を学ぶ学生にとって、構造力学は苦手となり得る科目の一つである。特に、建築デザインを志向する学生にとって、なじみにくい科目となる場合がある。しかし、建築士を目指す建築学生にとって、その初歩はマスターしなければならない科目でもある。一級建築士や二級建築士の試験においては、大学で学ぶ建築に関するすべての内容から出題されるからである。

久留米工業大学建築・設備工学科では、構造力学系の科目として、必修の講義と演習を6単位、選択の講義と演習を6単位設けているが、多くの学生に対し十分に理解させるレベルまで達していない。そのため、3年生前期に開講している、建築・設備工学実験の1課題として構造力学実験を行うための教材を開発した。本実験では、1課題につき4コマ(360分)で、15人程度の学生を割りあてている。「梁のたわみと強度」の内容は、2年前期の講義内容であることから、やや遅い実験ではあるが、学生の評価は、比較的良好であるので、教材の一例として報告する。

2. 既往の構造力学教材の例と本教材の位置づけ

日本建築学会では、「簡単な構造模型を使って、構造の仕組みを理解して頂く」、「アクティブラーニングの趣旨を生かしながら絵で見ることに視点をおいた企画」などとした、構造力学教材を示している^{(1), (2)}。

また、水野らは、安定・不安定、トラス、ラーメンから振動まで理解させる教材を開発している⁽³⁾。さらに、日比野らは、直感的な感覚の取得だけでなく、学生に構造計算を行う力を養う目的のための基本的な強度確認実験、学生の能動的な学習を促すためにコンテスト形式の実験を提案している⁽⁴⁾。

本報告での教材では、1) やや計算能力が不足する多くの学生に合わせて基礎的な実験とすること、2) 実験の時間内で完結できるように内容を絞ること、3) 用具数や学生の能力差を考慮し、比較的に構造力学の能力のある学生を中心とした班による実験とすることとした。

^{*1} 建築・設備工学科
令和4年11月13日受理

その結果、ここでは、4、5人の学生を1組とする4班で、10mm×5mmのヒノキ材を用い、①荷重と変形の比例関係の確認、②ヤング係数の評価、③集中荷重による単純梁のたわみの予測と実験、④等分布荷重による片持ち梁のたわみの予測と実験（以上第1日目）、⑥重ね合わせの法則の確認、⑦梁の曲げ強度の評価と実験（以上第2日目）に関する実験により、断面2次モーメントと断面係数の理解にとどめることとした。各計算式の運用も重要な経験と考えている。相反定理の確認もテーマとなり得るが、ここでは省いている。

なお、実験レポートも授業時間内に書かせて、ほか班員のものも参照させ、誤りを防止することとしている。

また、本教材では、構造力学の教育効果を優先させる目的から、日本建築学会が示す木材の実験方法⁶⁾等のような、厳しい精度は求めないこととしている。

3. 開発した構造力学教材の具体的な内容

写真1に、本教材で用いる用具を示す。変形を精度よく計測するため、実験用の台として、100mm×50mm×2.5mmの溝形鋼を用いる。机などではゆがみやたわみがあり、たわみの計測精度が大きく落ちる。梁は、市販（200円程度）の10mm×5mm×1820mmのヒノキ材とし、これを等分に切り、2班で分けている。この2班の比較で実験上の誤差、他2班との比較で材料のばらつきの傾向も示すことができると考えている。また、現在は、指金を用いてたわみを測定しているが、計測しにくい問題がある。最近、デジタル高さゲージがあることが分かったので、今後はこれを使うこととしたい。

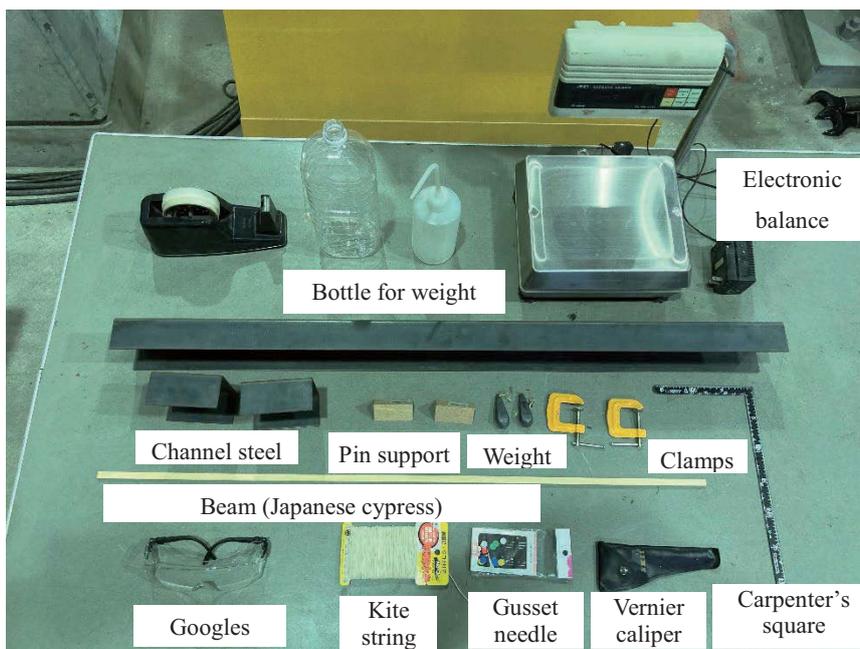


Photo 1 Tools for the test

3.1 荷重と変形の比例関係の確認実験

図1は、荷重と変形の比例関係の確認するための実験装置である。ヒノキ材の幅を10mm、せいを5mmとして、おもり(96g)1個の場合と2個の場合のたわみを計測させて、比例を確認させる。実験結果をその場で申告させ、白板に表で示し、他班と比較できるようにしている。以下の他の実験でも同様である。

また、たわみの計測を容易にするため、梁の側面に待ち針を刺して計測することとしている。

写真2は実験の様子を示す。

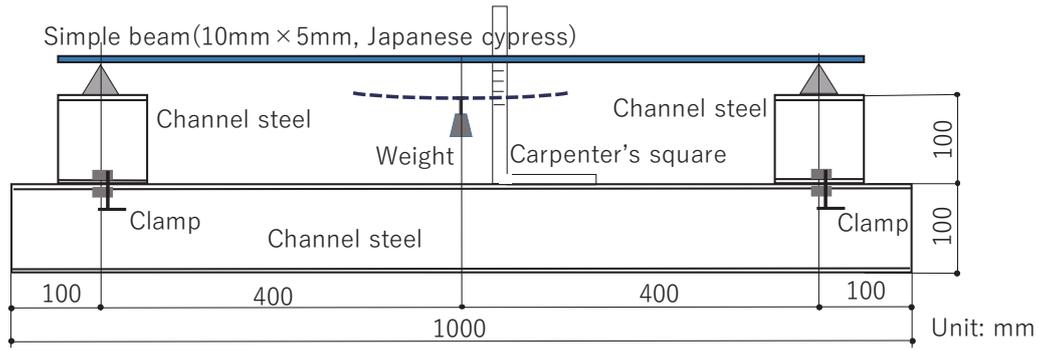


Fig.1 Apparatus for simple beam test



Photo 2 Deflection measurement of the test

3.2 単純梁実験によるヤング係数の計算および梁を縦にを使った場合のたわみの予測と実験

3.1に示す、中央に集中荷重を受ける単純梁のたわみの実験結果（おもり2個の時）を式（1）に代入して、ヤング係数を評価させる。さらに、ヒノキのヤング係数（ここでは、文献（6）などを参考に、 $0.8 \sim 1.2 \times 10^9 \text{N/mm}^2$ を使う）と比較し、近い値であることを確認させる。

$$\delta_s = \frac{PL_s^3}{48EI} \tag{1}$$

ここで、 δ_s : 中央に集中荷重を受ける単純梁の中央のたわみ、

P : 単純梁中央に加わる荷重

L_s : 単純梁のスパン長さ

E : 材料のヤング係数

I : 梁の断面2次モーメント

次に、得られたヤング係数を使って、梁を縦（幅5mm、せい10mm）に使った時のたわみを予測させ、実験で確認する。

3.3 片持ち梁の自重によるたわみの予測と実験

分布荷重を確実に理解させるため、梁の単位当たり長さの自重を評価させる。次に、梁幅を 10mm とし、図 2 に示す片持ち梁の先端のたわみを、式(2)の評価式を使って計算させる。その後、実験結果と比較させる。

$$\delta_c = \frac{wL_c^4}{8EI} \tag{2}$$

ここで、 δ_c : 等分布荷重を受ける片持ち梁の先端のたわみ、

w : 等分布荷重の単位長さあたりの荷重

L_c : 片持ち梁の長さ

E : 材料のヤング係数

I : 梁の断面 2 次モーメント

なお、はり先端のたわみの実験値は、固定端の高さととの差で評価する。また、梁試験体は、元たわみがある場合があることから、表・裏について計測させ、その平均値を実験値としている。

写真 3 は実験の様子を示す。

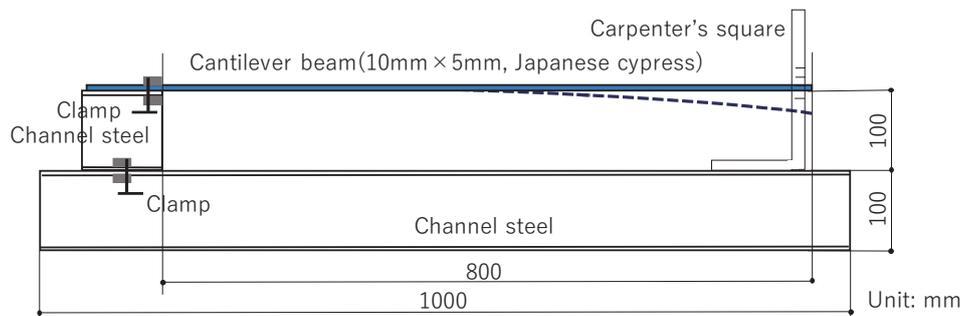


Fig.2 Apparatus for cantilever beam test



Photo 3 Measurement of a cantilever beam

3.4 単純梁による重ね合わせの法則の確認実験

複数の荷重がある場合、弾性時のたわみが、それぞれの荷重による重ね合わせで得られることを確認する実験である。Fig. 3 に示す装置により、荷重 2 個のたわみは、それぞれの荷重のたわみの和で評価できることを確認する。写真 4 は実験の様子を示す。

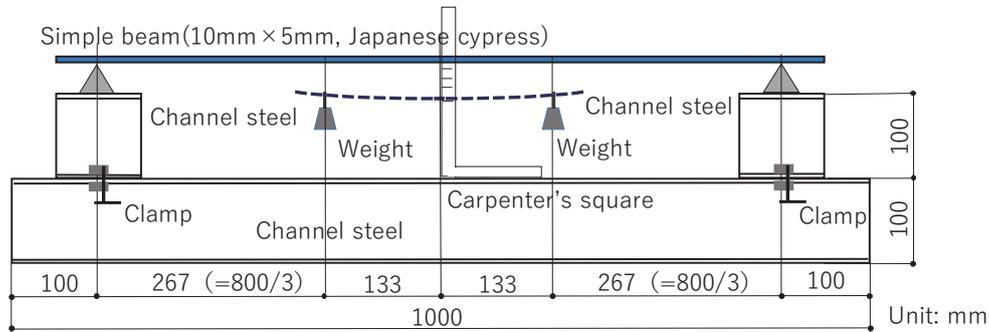


Fig.3 Apparatus for superposition principle test



Photo 4 Test of the superposition principle

3.5 梁の曲げ強度の評価と実験

図 4 に片持ち梁実験装置を示す。先端に 2 リットルのペットボトルを吊り下げて、梁が折れるまで水を注ぐ。ここでは、弱軸回りの耐力としている。また、文献 (6)などを参照し、ヒノキの曲げ強度は 75N/mm^2 と想定している。片持ち梁の長さは、1 班と 3 班は 300mm, 2 班と 4 班は 400mm とし、長さの影響と、材料のばらつきの程度が評価できるようにしている。

まず、先端に集中荷重を受ける片持ち梁が固定端で曲げ破壊するときの荷重の評価式である式(3)を誘導させる。次に、各値を代入させて、固定端で曲げ破壊するときの荷重の予測値を計算させる。

$$P_u = \frac{ZF_b}{L_p} \quad (3)$$

ここで、 P_u :先端に集中荷重を受ける片持ち梁が固定端で曲げ破壊するときの荷重

Z :梁の断面係数

F_b : ヒノキの曲げ強度

L_p :片持ち梁の固定点から荷重点までの距離

この実験では、破壊時にたわみがかかなり大きくなる。そのため、有限変形の影響により固定端の曲げモーメントが、変形前の評価より小さくなり、実験値が過小評価される傾向がある。特に長さ 400mm の時に、30%から 50%程度の過小評価となり、影響が大きくなる。

この影響を説明することもできるが、場合によっては片持ち梁の長さ 400mm を 250mm 程度に変更することも良い。しかし、そうすると破壊時の荷重がそれに応じ大きくなるので、2リットルのペットボトルでは不足する可能性がある。

写真5は実験の様子を示す。

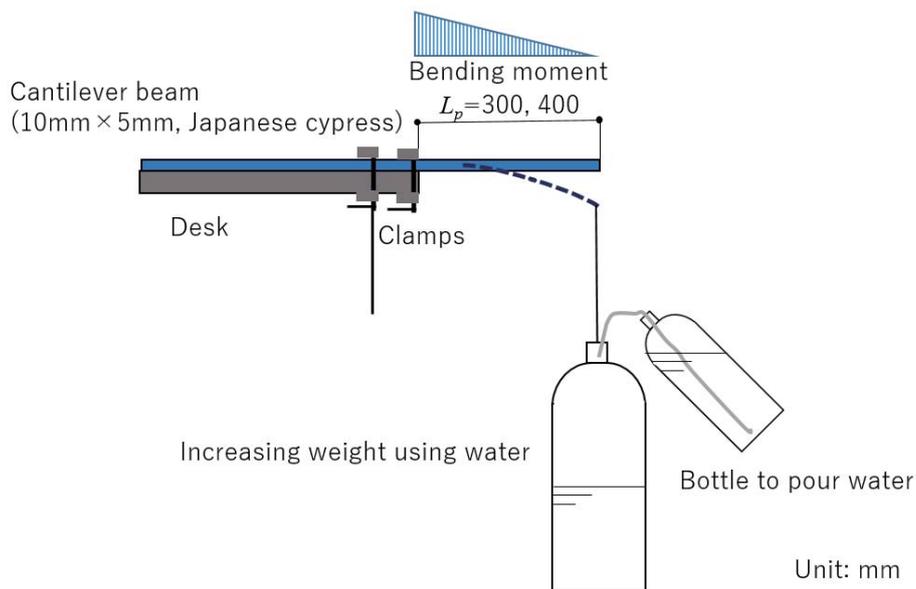


Fig.4 Apparatus for beam bending test



Photo 5 Bending strength test

4. 開発した構造力学教材の受講者の評価

統計的な評価を行っていないため、レポートに記された評価の例を示す。

- ・実物で実際に行う方法は、文字や数字で見るよりも格段に分かりやすかった。自分たちで計算を行い、実験に移ることで、差を確認することができる。それが構造力学の面白いところだと感じた。
- ・計算で予測した計算値と実際に測って導き出した実験値が近かったり、重ね合わせの法則の実験でぴったりの値が出ると、今まで文章だけで勉強していたことの証明ができた気がして、有意義な実験ができたと感じた。
- ・今まで梁については座学など教科書の計算でしかしたことがなく、全く想像が出来なかったが、今回の実験で、自分の目で梁が折れる瞬間を見ることが出来、良い経験になった。これまで、テレビなどで何気なくものが壊れるところを見ていたが、構造力学の観点から見られるようになり、建築構造の理解が進んだ。
- ・実験することで分かりやすく、楽しかった。構造が苦手で、あまり好きではなかったが、今回の実験で少しだけ理解できたので良かった。
- ・他の班と実験結果を比較することで、より正確な結果を出すことができたと思う。

改善の提案として、内容的に2年前期など、もっと早くやってほしい旨の要望があった。そのほかは、記名のレポートの感想のためもあり、否定的な反応はほとんどなかった。

5. 結 論

本報告における教材開発では、1)構造力学の知識や計算能力がやや不足する多くの学生に合わせて基礎的な実験とすること、2)実験の時間内で完結できるように内容を絞ること、3)用具数や能力差を考慮し、構造力学の能力のある学生を中心とした班による実験とすることとした。

その結果、おおむね効果的な教材となっていると感じている。更なる改善のためには、教育効果について、統計的な調査が必要である。

文 献

- (1) 日本建築学会，“はじめてまなぶちからとかたち”，日本建築学会，第6刷，2016.9.30
- (2) 日本建築学会，“絵で見るちからとかたち”，日本建築学会，第1刷，2013.7.1
- (3) 水野隆介，平野道勝，“構造力学教育のための模型実験の開発”，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），1992.8，pp.1227-1228
- (4) 日比野陽ほか，“模型実験を用いた構造力学教育の提案，その1～その2”，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），2003.9，pp.785-788
- (5) 日本建築学会“建築材料実験用教材”，日本建築学会，2010.2.1
- (6) <https://fairwood.jp/woodguide/wood/japan/hinoki.html>