

# デザイン学生に向けた構造教育授業における マドラー・ブリッジの設計と載荷実験

日大生産工 ○早川健太郎 日大生産工 中川一人

## 1. はじめに

日本大学生産工学部創生デザイン学科では、3年生を対象に「材料力学演習」を開講している。授業目的は、「ものづくり」において正しい判断を下すために大きな比重を占める力学の知識を得ることである。材料力学・構造力学は多くの学生にとって初めて学ぶ分野であることから、「力」や「材料・断面の性質」のイメージをつかむことに重点をおき、部材・構造物の力学的な振る舞いについて直感的な理解を促すため、実験を交えた演習を複数取り入れている（表1）。日本建築学会の初学者向け教材<sup>1)</sup>や、他の大学の力学教育<sup>2-4)</sup>でも、模型を使って構造のふるまいの直感的な理解を促す取り組みが行われている。さらに、建築構造家である川口衛 法政大学名誉教授は設計活動において模型に手などで加力して構造物の挙動を理解する「タッチ&フィールモデル」<sup>5)</sup>の概念を用いており、理論と実感をつなげる取り組みは教育・実務の両面において重要視されている。

表1 令和7年度の材料力学演習で実施した実験課題の一覧

実施講義回	実験内容
第3回	ゴム試験体の引張による変形の測定とヤング率の計算
第5回	単純支持張りの載荷位置に対する支点反力の変化の測定
第11回	断面2次モーメントの異なる片持ち梁のたわみ量の比較
第12~14回	マドラー・ブリッジの設計・載荷



Fig.1 教員による予備実験

本稿では、材料力学演習の講義を締めくくるかたちで実施されたマドラー・ブリッジの設計・載荷実験課題について概要と結果を報告する。マドラー・ブリッジ課題は、2023年に日本建築構造技術者協会 (JSCA) が主催し、日本大学理工学部駿河台校舎で実施されたアイス棒ブリッジコンテスト<sup>6)</sup>を参考にして計画された。Fig.1に示すように、木製マドラーで製作された橋の両端を3Dプリンタで作成したパーツで単純支持し、中央部に荷重をかけ、破壊するまでの荷重と変位を測定する実験を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1. 設計条件

市販されている幅6mm、厚さ2mm、長さ120mmの木製マドラーでスパン550mm以上の橋を設計する。マドラーを切断して使用することも可とした。桁行方向 (Fig. 1の左右方向) のマドラーは酢酸ビニル系木工用接着剤で接合し、梁間方向 (Fig. 1の奥行方向) は3Dプリンタで製作したパーツを用いて部材の直交が保たれるように接合する。使用する3Dプリント接合パーツの数の上限は10セット、計20個とした。また、水を入れたペットボトルを吊ることによる一点集中載荷とし、載荷点の位置は支持部から100mm未満の範囲を除いて自由に設定してよいものとした。なお、予備実験においてマドラーが載荷点で先にせん断破壊したため、実験本番では載荷部分のみ外径6mm、長さ120mmのアルミパイプを用いた。支持構造は3Dプリンタで製作し、単純支持を再現できるよう回転自由度を拘束しない設計とした。

履修学生を4名ずつ24グループに分け、グループごとにマドラー・ブリッジの設計、製作、載荷試験をそれぞれ第12、13、14回の講義内（各200分）で行った。設計と実験後レポートの作成には（株）構造計画研究所が提供する設計変更に対してリアルタイムで構造解析が可能なソフトウェア「MyStructureNote」<sup>7)</sup>を使用し、設計変更に伴う応力状態やたわみを可視化しながら行った。

Design and loading test of stirrer bridges in structural education classes for students in design field

Kentaro HAYAKAWA, Kazuto NAKAGAWA

## 2.2. 実験条件

載荷用のアルミパイプ部材に吊るしたペットボトルの水の量を段階的に増やしながら、荷重に対する載荷点の鉛直変位の変化と破壊までの最大支持重量を測定する。水とペットボトルを合わせた最小重量は1kgとして、1.5kg, 2kgと500g刻みで重量を増やし、2kg以降は橋の変形状況を見ながら実験グループごとに重量増分を決定させた。

## 2.3. 評価方法

製作した橋の重量（自重）と破壊せずに支持できた最大の重量（最大支持重量）の2点を評価項目とし、自重と最大支持重量のそれぞれについて、表2に示すとおりA~Dの4段階にランク分けしてグループの得点を決定した。また、支持重量に関しては2kgを合格ラインとし、2kgを下回った場合には減点することとした。

表2 評価項目のランク分け

ランク	自重	最大支持重量
A	80g未満	4.5kg以上
B	80g以上	3.5kg以上
	90g未満	4.5kg未満
C	90g以上	2.5kg以上
	100g未満	3.5kg未満
D	100g以上	2.5kg未満

## 3. 実施結果

### 3.1. 設計・製作時の様子

Fig. 2に示すように各グループに配布したグラフ用紙と構造解析ソフトウェアを使用して、マドラーの配置を検討した。実際の橋の構造を参考に、部材配置による応力の集中・分散やたわみの様子をソフトウェアで確認しながら設計を行っている。過大な応力が特定の部材に集中しないような工夫や橋の最大たわみを小さくするような工夫が見られた。

マドラーブリッジの製作時には、設計時に考慮できていなかった部材の幅や厚みによって設計変更を余儀なくされるグループや、机上の設計と寸法が合わず、調整に苦労しているグループが見られた。実験結果に製作時の誤差が大きく影響することから丁寧に製作するよう教員から指導があったが、精度良く部材を加工、組み立てる経験の不足から知識やスキルが未熟な学生も多く見られ、構造力学的な工夫以上に製作過程に学生の意識が向いてしまった点は課題として残った。



Fig.2 構造解析ソフトウェアを使用したマドラーブリッジの設計の様子

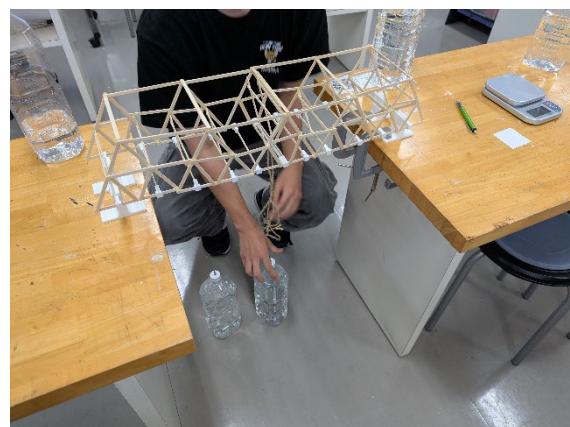


Fig.3 実験風景

### 3.2. 構造実験の実施

載荷試験の前に製作したマドラーブリッジの重量を計測した。その後、くじ引きにより載荷試験を実施する順番を決定し、4グループずつ同時に載荷試験を行った。Fig. 3のようにグループ内の4人で載荷、記録、撮影などの役割分担をし、実験を実施した。機材準備の関係もあり、たわみの計測はものさしを使用した簡易的なものとなっている。一点集中荷重という条件下で、載荷用アルミパイプ部材の配置方法や

載荷点の位置の決定は学生自身に委ね、載荷方法や対称性の崩れによる橋の挙動についても観察・考察させるような実験構成とした。

### 3.3. 実験結果

Fig. 4にマドラー・ブリッジの重量と破壊前の大支持重量の分布、Fig. 5に最大支持重量と最大支持重量時のたわみの分布をそれぞれ示す。橋の重量は最小71g、最大120g、平均91gで、最大支持重量は最小2000g、最大7000g、平均3673gであった。また、最大支持重量時の載荷点でのたわみは最小2mm、最大83mm、平均19mmであった。

Fig. 4では、グラフの左上ほど軽量かつ大きい荷重に耐えられるため、良い設計であるといえる。Fig. 4, 5にAで示したグループが作成したFig. 6に示す橋は自重が74.5g、最大支持重量が6100gであり、最大支持重量時のたわみは9mmで最高評価を獲得している。

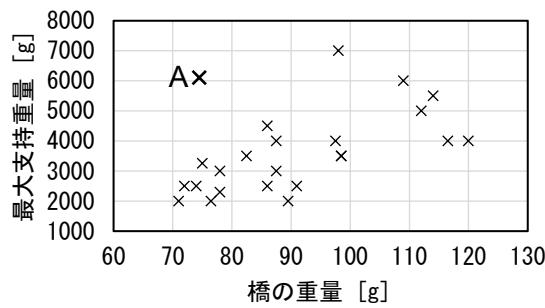


Fig. 4 自重に対する最大支持重量の分布

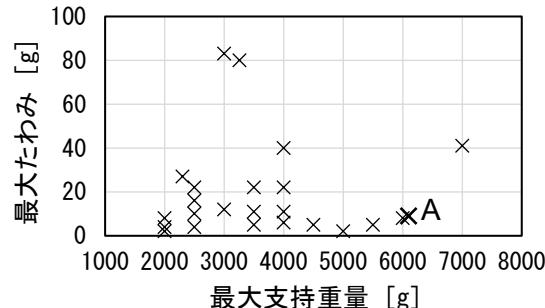


Fig. 5 最大支持重量と最大たわみの分布



Fig. 6 グループAのマドラー・ブリッジ

Fig. 4の自重と支持重量およびFig. 5の支持重量とたわみの関係は実験実施前には正の相関を示すであろうと予想されており、Fig. 4の結果については概ね予想通りであったが、Fig. 5については予想以上にばらつきが大きく、設計と製作方法によって橋の剛性が大きく異なるという結果が得られた。

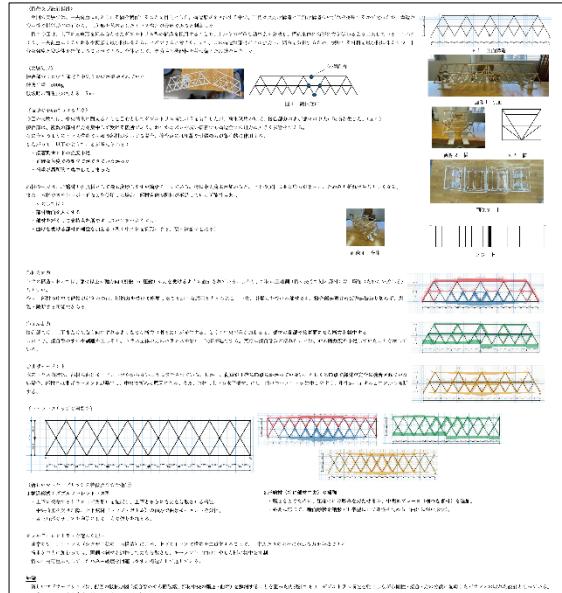


Fig. 7 提出されたレポートの例  
(一部著者により加工)

### 3.4. 実験レポート

実験後に、Fig. 7のようなレポートを作成、提出させた。レポートには、材料力学演習をとおして学んだ力学的な観点や、実験での発見、および MyStructureNote などのソフトウェアによる解析結果を踏まえたうえで、以下の 5 点の内容を必ず含むよう指示した。

1. 自身のグループが製作したマドラー・ブリッジの特徴を述べるとともに設計の指針を述べる。
2. 実験結果（破壊荷重および破壊時の載荷点のたわみ）を記載し、破壊箇所および破壊の形態について記載する。
3. 破壊した箇所ならびに破壊の形態について考察する。
4. 上記の破壊を回避が可能なマドラー・ブリッジを再度設計する。
5. 新たなマドラー・ブリッジの特長を述べるとともに設計の指針を述べる。

提出されたレポートでは、部材の応力をいかに分散させるかに焦点をおいて設計したとす

る記述が目立った。これはインターネットなどのトラス橋の構造設計に関する記述に強く影響されているものと考えられる。また、支持荷重として2kgを合格ラインとすることを設計時に教員が強く意識させ過ぎたことによる影響か、軽量化よりも補強に重点をおいた設計が目立ったため、評価基準や設計時の学生の意識の誘導先には改善の余地があると考えられる。

#### 4. 考察

本実験は、学生が自らマドラー・ブリッジを設計し載荷試験を行って壊すことで、材料力学・構造力学の座学のみでは得ることの難しい、力学の直感的な理解および設計との結びつきの意識付けを促すことを目的として実施された。レポートの内容等から、一定程度の効果が見られた一方、設計～実験の内容について改善すべき点も見られた。

前述のとおり、実構造物の設計において意識されている荷重、応力の分散を念頭に設計されたマドラー・ブリッジが多かった。学生自ら調べ、講義内の知識と実務を結びつけるという点で効果があったと期待される。しかし、参考にした事例が一部のトラス橋に偏っているように見えたことから、設計に入る前に構造物の形式（トラスやラーメンなど）やその設計思想について教員からある程度の解説を行っておいた方がバリエーション豊かな設計結果が得られたのではないかと考えられる。また、全てのグループが合格ラインとして設定した支持重量2kgを越えたことからも、マドラーという強度が限られた部材を使用して強い橋を設計する工夫が随所に見られたことが収穫である。一方、橋を強固に補強することに学生の意識が強く向いてしまい、軽量化や見た目の美しさについての追求があまり見られなかつた点は反省点として挙げられる。次年度以降には、軽さや美しさにも意識が向くよう、評価方法の設定と伝え方に工夫が必要である。

実験前の設計および最終レポートでの再設計段階では、構造解析ソフトウェアを使用して応力やたわみが小さくなるような部材配置や橋の形状を探索した。このとき、正しく断面力図やたわみ図を活用し、よい設計を導き出すことができたグループがある一方で、レポートの記述と断面力図や実際の設計が整合していないように見えるなど正しく図を読めていないと考えられるグループもあった。講

義内で梁の断面力図の書き方については丁寧に解説していたが、設計時にどのように図を活用していくのかなど、「解析結果の読み方」についての解説が不十分であった。

#### 5.まとめと展望

本稿では、日本大学生産工学部創生デザイン学科で開講されている令和7年度の材料力学演習において実施した、学生によるマドラー・ブリッジの設計と載荷試験の演習について概要と結果を報告した。力学の直感的な理解と計算結果と実現象の結びつき、設計との結びつきを意識させることにおいて一定の効果が見られた一方で課題も見られた。次年度以降の演習においては、学生の力学への理解がより深くなるよう、より適切な設計条件を設定すること、およびマドラー・ブリッジの設計・実験結果、最終レポートの評価方法を改善していくことが望まれる。

#### 謝辞

株式会社構造計画研究所より構造解析ソフトウェア「MyStructureNote」のライセンス提供を受けた。

#### 参考文献

- 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, 2016
- 2) 辻 聖晃, 高畠顯信, 北尾聰子, こわして学ぶ建築構造教育の試み, 大阪電気通信大学研究論集(自然科学編), Vol. 56, pp. 29-40, 2021
- 3) 上原修一, 構造力学実験教材の開発: 梁のたわみと強度, 久留米工業大学研究報告, Vol. 45, pp. 132-138, 2022
- 4) 宮里直也, 岡田 章, 廣石秀造, 鴛海 昂, ものづくりを通じた体験的建築構造教育の実践, 工学教育研究講演会講演論文集, pp. 286-287, 2022
- 5) 川口衛, 構造と感性, 鹿島出版会, 2015.
- 6) 日本建築構造技術者協会 (JSCA), アイス棒ブリッジコンテスト2023, <https://jscaportal.org/events/event/4755/> (参照: 2025/10/2)
- 7) 構造計画研究所, MyStructureNote, <https://mystructure-site.kke.co.jp/for/construction-worker-2/> (参照: 2025/10/2)