

紙で作る橋のコンテスト

学生の工夫とその解説

田中 聖三*

(令和6年10月30日受付)

Contest of Paper Bridge Student's Ingenuity and its commentary

Seizo TANAKA

(Received October 30, 2024)

Abstract

本学環境土木工学科では、土木工学での学びの第一段階として1年次生に対し、代表的な土木構造物である橋梁に関する専門科目を設置している。講義では橋梁の機能や名称、橋梁の分類、構造形式、設計方法の説明を行っているが、加えて実習として紙で橋梁を作成し、使用材料量、耐荷重を競うコンテストを実施している。これは当該講義で学んだ橋梁の仕組みを実際に体験することにより理解を深め、構造力学の学びへのスムーズな接続を目的として実施している。本論文では強度を向上させる方策、紙材料の問題点について説明し、コンテストに提出された学生の工夫についてそれぞれ紹介し、構造力学的観点から解説を行った。

Key Words: Paper bridge, Structure engineering, Bridge engineering

1. はじめに

橋梁は障害となる対象を避けるためにその上方に設置された輸送路であり、我々の身近な構造物である。橋梁は地上部にあり、都市部でも目にすることができることから、土木構造物の中でも代表的な構造物であるといえる。また、橋梁はその目的から状況によってはより長い支間長とする必要があり、荷重となる自重を削減するために構造物を軽量化しなければならないが、一般に断面積の減少は強度低下となる。そのため実際の橋梁では様々な工夫がなされているため、構造力学的に非常に洗練された構造物であるといえる。

そのため、本学環境土木工学科では1年次に専門科目の入門として橋梁を対象とした科目が設置されており、橋梁の機能、名称、橋梁の分類、構造形式、設計方法について学ぶ。その講義の中で、受講生に実習として紙を用いて橋

梁を作成し、使用材料量、耐荷重を競うコンテストを実施している。これは実際の橋梁技術を模倣し、当講義で学んだ橋梁の仕組みの理解を深めることを目的としており、さらに構造物のどのような部分にどのような力が作用しているかを体感することで、次に配置されている構造力学へのスムーズな接続を目的としている。

紙で橋梁を作成するために、実際の橋梁で用いられている強度、安定性を向上させる技術をそのまま利用することができる部分もあるが、そのまま用いることができない場合もある。これは紙は引張に対する強度は高いが、その薄さに起因した圧縮に対する強度が低いことが原因であり、この性質をいかに理解し、対策を講じるかが工学的な問題となる。そこで本論文ではこれまで5年間で実施したコンテストで学生が作成した紙の橋梁の成功例（また、失敗例）を紹介し、構造力学的視点から解説を行う。

* 広島工業大学工学部環境土木工学科

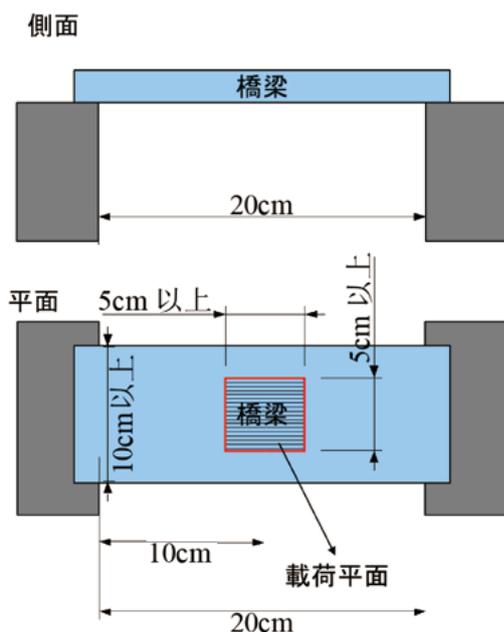


図1 橋梁寸法

2. コンテスト概要

2.1 橋梁寸法

コンテストで作成する橋梁は図1に示すような支間長20cm以上の1径間橋梁である。1径間であるため途中に橋脚などの支点を設置してはならない。また、橋梁（桁）は橋台と接着してはならないが、吊り構造とする場合の主塔、アンカーは橋台（地表面）と接着は許可される。ただし、吊り構造の場合、主塔と桁は接着してはならない。

2.2 使用材料

使用材料としては、橋梁本体はA4のレポート用紙、またはコピー用紙である。また、接着材料としては、ステープラー、セロハンテープ、のりのみが許可されている。ちなみに、ステープラーはリベット接合（支圧接合）、セロハンテープは溶接、のりは高力ボルト接合（摩擦接合）に対応している。なお、セロハンテープをぐるぐると巻くなどの補強目的の使用は禁止している。

2.3 評価基準

コンテストは支間中央部に載荷を行い、その載荷重量の大きさを競う。また使用材料の枚数も評価基準とし、より少ない枚数で耐荷重が高いものが評価が高くなる。しかし、これはあくまで指標であり、コンテストと名前はないが、他人との比較、競争ではないため、数値評価を行ってはいない。載荷に関しては「何か重さの分かるもの、中身の入ったペットボトルなど」としている。

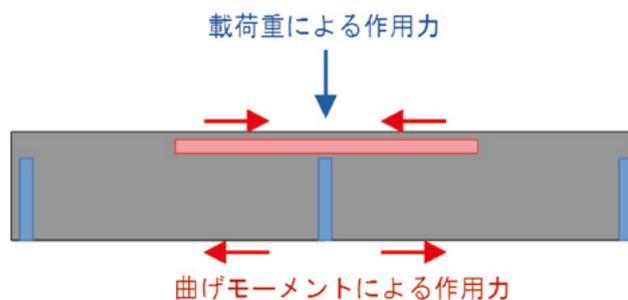


図2 垂直・水平補剛材の配置（桁側面）

3. 橋梁の強度向上について

3.1 基本的な方針

橋梁の強度を向上させるための基本方針としては、まず、“桁の強度を上げる”ことと“荷重を分散させる構造形式とする”こととなる。

前者としては、強度を上げるためにはまず、桁に作用する曲げモーメントに抵抗するために断面2次モーメントを大きくするような断面とする必要がある。ここで問題となるのは、断面2次モーメントを大きくするためには、高さを大きくする必要があり、そうすると高さ方向に細長い桁断面となってしまう。細長いものに鉛直荷重を作用させると座屈という破壊現象が現れる。これに対応するためには垂直補剛材と呼ばれる部材を配置する。図2に補剛材の配置図（桁側面）を示すが、図中の青い部材が垂直補剛材である。また、もう一つの力として、曲げモーメントにより作用する力があるが、これは桁上縁には圧縮力、桁下縁には引張力が作用することとなる。この上縁の圧縮力に抵抗するために設置されるのが図中赤く表示されている部材であり、水平補剛材と呼ばれる。

また後者としては、代表的なものに、トラス形式、アーチ形式、吊り構造として、斜張形式、吊り形式がある。実際の橋梁では紹介順に対応支間長が長くなるが、紙材では作成しにくい構造形式もある。紙材の特徴について次節で説明する。

3.2 紙を用いた構造の強度向上

紙の特徴として、薄い材料であり、引張に対しては十分に強度があるものの、そのままでは圧縮力に全く抵抗することはできない。圧縮力に抵抗するためのアプローチとしては大きく2つ挙げられる。一つは何らかの形を作成し、それを補強していく方法である。先の補剛材が一例であるが、例えば矩形断面の桁を作成し、その中に心材を配置する方法も考えられる。ただし、この心材もただ配置すれば良い訳でもなく、例えば矩形断面内に三角形の心材の向き

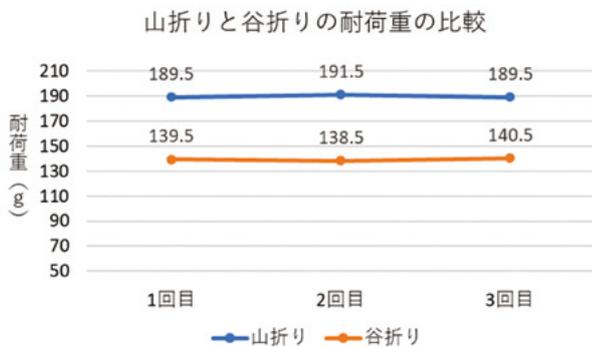
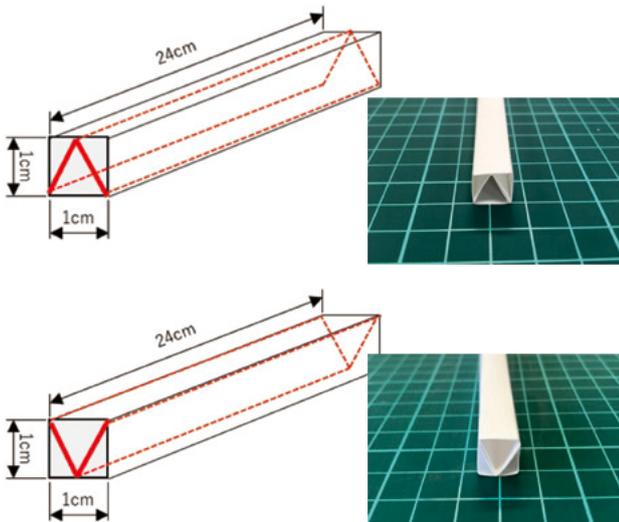


図3 矩形断面の心材向きおよび耐荷重量の比較

の比較実験では、図3のように、山折りと谷折りで耐荷重に差が出ていることが分かる^[1]。圧縮力に抵抗するための方法の二つ目は、紙材を円形に巻いていく方法で、この方法では巻く密度を高くするほど強度が大きくなる。その反面、使用材料 (= 枚数) が増えてしまう傾向にある。

4. コンテスト作品の紹介と解説

4.1 桁形式

構造形式としては最も単純な桁形式の作品を紹介する。これは桁をいかに強くするかが工夫点となる。図4には円形の桁に山折りの心材を入れたもの示す。円形部分は1~2重程度で密度が低いため、山折りの心材の固定材の役割となっている。もう一方で、桁高をあげ、強度をあげたものとして、図5に実際のI型断面桁を模した作品を紹介する。こちらの作品では垂直補剛材が配置され、支間中央部には水平補剛材も設置されている。また、複数桁も横桁で接続され、荷重が分配できる実際の橋梁の機構を完全に模倣している。しかしながらやはり鉛直方向の剛性が足りず鉛直方向に座屈破壊が生じやすい。



図4 桁形式1



図5 桁形式2



図6 トラス形式

4.2 トラス形式

トラス形式は三角形を組み合わせた構造形式であり、構造高を容易に高くすることができ、部材には軸力しか作用しないことが特徴である。軸力しか作用しないため、容易に圧縮力に対応することができる、紙を円形に巻く方法による施工が多かった。一例を図6に示すが、トラス形式を採用した作品は、どれも耐荷重が高い特徴がある一方で、強度は巻きの密度によるため、密度を高くするためにはより多くの材料が必要となる傾向があった。耐荷重としては5kgを超えるものもあった。

4.3 アーチ形式

アーチ形式はしなった部材(弧)に鉛直荷重がかかることにより水平方向の力に変換されこれに抵抗することで構造物の剛性を上げる形式であるが、弧の部分には基本的に圧縮力が作用するため、紙材では再現が難しい構造形式である。つまり円形に巻いた部材は直線となるので、弧の部分(アーチリブ)の曲線形状を再現することが難しい。



図7 アーチ形式（失敗例）

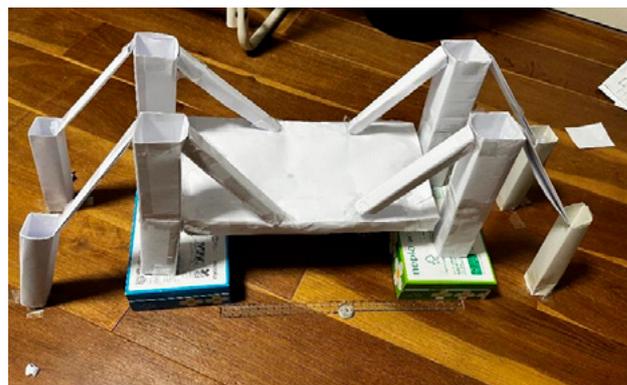


図10 吊り形式（斜張橋）



図8 アーチ形式（ローゼ橋）



図11 桁形式（I型桁橋）



図9 アーチ形式（太鼓橋）

学生の何人かはこの難しい形式に挑戦しているが、失敗も多く、図7に失敗例を紹介する。この作品ではアーチ形式を模擬してはいるが、アーチリブの剛性が足りず、荷重に対して全く抵抗することがないものとなっている。一方で、少数ではあるが成功ケースもあり、図8にアーチリブが太いローゼ橋が模擬されている。ただ、アーチリブの剛性はまだ低いようで、もう少し工夫が必要である。また、図9には太鼓橋のようなアーチ形式を模したものもある。先のローゼ橋と同様にリブを強くする必要があるが、こちらは心材を入れて補強しており、学生本人はプラットラスと主張しているが、奇しくも錦帯橋の肘木作りに近い構造となっていた。

4.4 吊り形式

吊り形式には主塔に曲げを受ける斜張橋と曲げを受けない吊り橋があるが、図10に斜張橋の作品を紹介している。アンカーは地上と固定可能であるため、強い抵抗力を生むことができるが、それに耐えられる主塔を作成しなければならず、この辺りに工夫の余地がまだまだある。

4.5 その他

その他、長所を組み合わせた作品もあり、特に合理的な設計となった作品を図11に示す。こちらは形式としては単純なI型桁であるが、上下フランジに円筒を用いて剛性を上げ、さらにウェブ材で接続し、構造高を上げて剛性を向上させており、非常に合理性の高い設計である。

5. おわりに

本論文では、紙で作る橋の実習で提出された作品の紹介とその構造力学的観点からの解説を行った。難しい構造形式、特にアーチや吊り形式はまだまだ工夫の余地があるように思う。今後も講義を通して、いろいろなアイデアを伝え、学生の創造性を刺激していきたい。

参考文献：

- [1] 石本雅樹 “ペーパーブリッジにおける主桁強度に関する研究” 2021年度広島工業大学卒業論文, 2022.1