

中国組積木橋における虹橋と廊橋の構造特性の比較

Comparison of structural characteristics of HONGQIAO and Corridor Bridge in Chinese masonry Bridge

○和雨思¹, 関文夫²
Yusi He¹, Fumio Seki²

Abstract: Hongqiao and Corridor Bridge are the peak masterpieces of ancient wooden bridges in China. Their timber weaving structure and construction techniques make straight-line logs form an arch structure. Based on the historical investigation of Hongqiao and Corridor Bridge, this paper infers their size and analyses their structure, so as to find out the similarities and differences between Hongqiao and Corridor Bridge. Then, according to the stress analysis results, the structural characteristics of Hongqiao and Corridor Bridge are obtained, hoping to find a more reasonable structural form.

1. はじめに

中国の組積木橋は中国北宋時代 (A.D.960-1127) に出現し、釘やボルトなどは使わず、木材の組み合わせのみで架橋している。中国に今も存在している組積木橋は、約130橋である。ほとんどが福建省と浙江省に集中している。組積木橋は宋時代から架けられ初め、明時代と清時代に全盛期を迎えた。

本研究では虹橋 (こうきょう) と廊橋 (ろうきょう) の構造モデルに着目し、構造特性から、中国組積木橋の進化を探求する。

2. 虹橋と廊橋の紹介

(1) 虹橋と廊橋

虹橋 (1041年) という橋が汴河 (べんが) に架けられた^[1]。虹橋は形状が虹に似ていることからこのように名付けられた (Figure 1)。廊橋とは1137年から木材の劣化速度を遅くするため、屋根付き組積木橋の総称である (Figure 2)。

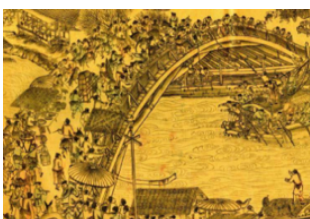


Figure 1. Hongqiao



Figure 2. Corridor Bridge

(2) 虹橋と廊橋の構造モデル

虹橋は、2つの構造システムで構成されているが、同一部材を組合せた構造である (Figure 3)。廊橋は、2つの構造システムで構成されているが、中央部に長い水平材を設けた構造である (Figure 4)。したがって、第1システムは、同一部材3本で構成され、第2システムは、長さの異なる5本部材で構成されている。6本の横材はアーチ

面と垂直に配置され、アーチ材と十字形相欠き継ぎで噛み合っている。廊橋モデルでは、水平材に着目すると、隣接するアーチ材の自重の支点反力が横材AとBを介して、集中荷重として作用する構造となっている。これが、虹橋モデルとの最大の構造特性の違いである。

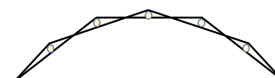


Figure 3. Hongqiao's model

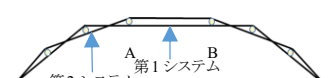


Figure 4. Corridor Bridge's model

(3) 虹橋と廊橋の基礎データ

現存する廊橋の橋長、支間長、幅員、スパンライズ比などから廊橋の特性を分析した。廊橋の橋長とスパンは一般的に20m~30mであり、虹橋よりも廊橋のスパンが長くなることが分かった。中国の廊橋では、一番長いスパンが37.6mである (Figure 5)。廊橋は歩道橋であるため、幅員は広くない、一般的に3m~7mがある。福建省と浙江省の18橋のスパンとライズを調べて、廊橋のスパンライズ比は1/5~1/7が得られた (Figure 6)。虹橋より廊橋の方がアーチ構造として適切なスパンライズ比が用いられている。

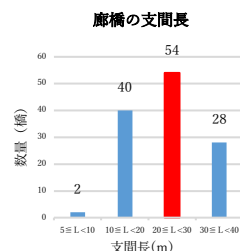


Figure 5. Corridor Bridge's span

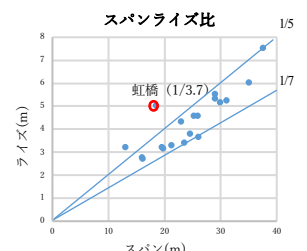


Figure 6. Rise/Span ratio

3. 虹橋と廊橋の寸法の推定

廊橋構造モデルは寸法が多様であるので、虹橋の寸法から推定する。虹橋は元27年 (A.D.1290) 頃、黄河の洪水被害を受け、虹橋が崩壊した。だから、『清明上河図』

1 : 日大理工・院 (前) ・土木 2 : 日大理工・教員 ・土木

という画卷で虹橋の周辺の人物及び建物の寸法の比率を計算することにより、虹橋の寸法を推定した。Figure 7に示すように虹橋の主架構の中心線は円弧であると仮定し^[2]、(1)式～(6)式の計算式を利用して、部材長、スパン、ライズを推定することができる (Table 1)。

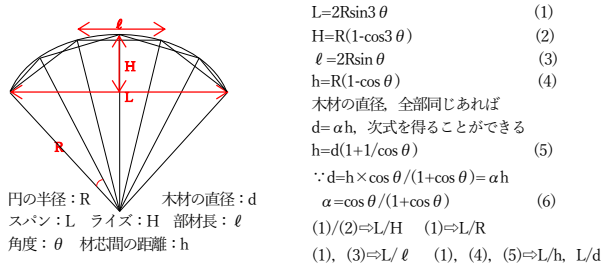


Figure 7. Geometric model and calculate

Table 1. Dimension

| | 虹橋 (推定) | 虹橋構造 モデル | 廊橋構造 モデル1 | 廊橋構造 モデル2 |
|------------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| 部材長 $l(\theta')$ | 7.2m | 9.8m | 7.2m(6.6m) | 7.2m(4.7m) |
| 木材の直径 d | 0.3m | 0.3m | 0.3m | 0.3m |
| スパン L | 18.5m | 25.1m | 25.1m | 25.1m |
| ライズ H | 5.0m | 6.8m | 5.0m | 3.59m |
| スパンライズ | 1/3.7 | 1/3.7 | 1/5.0 | 1/7.0 |

4. 虹橋と廊橋の構造特性

本研究では、虹橋と廊橋の主架構に軸力と曲げモーメントの確認と、その一般的な力学特性を調べることを目的として、境界条件や荷重条件そして材料特性を適切に仮定して (Table 2), Ezy-Frame を用いて骨組解析を行った。解析では、集中荷重を 10kN、自重を 0.3kN/m² と仮定した。虹橋と廊橋構造モデルでは、集中荷重を中央に設け。

Table 2. Hypothetical situation

| | |
|------------|-------------------------------------|
| スギの弾性係数 | 7×10 ⁶ kN/m ² |
| 木材の単位体積重量 | 4.0kN/m ³ |
| 自重 (等分布荷重) | 0.3kN/m ² |
| 活荷重 (集中荷重) | 10.0kN |

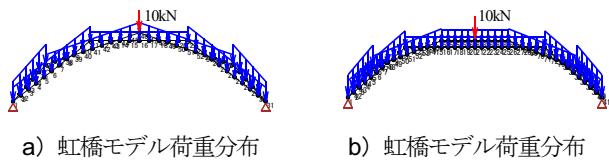


Figure 8. Load

当時の技術で完全剛接合することが困難であることを考慮して、相欠き継ぎの接合部をピン接合と仮定した^[3]。軸力と曲げモーメントの分布と骨組解析の結果をそ

れぞれ Figure 9, Table 3 に示す。

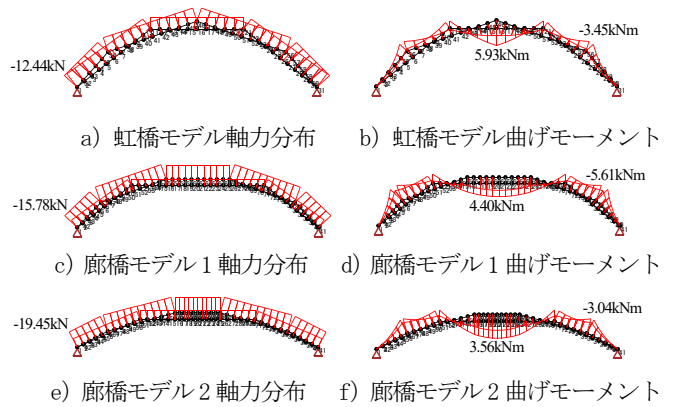


Figure 9. Sectional force

Table 3. Analysis result

| | 虹橋構造モデル | 廊橋構造モデル1 | 廊橋構造モデル2 |
|------------|----------|----------|----------|
| 軸力 | -12.44kN | -15.78kN | -19.45kN |
| 曲げモーメン (負) | -3.45kNm | -5.61kNm | -3.04kNm |
| 曲げモーメン (正) | 5.93kNm | 4.40kNm | 3.56kNm |

この解析結果より、下記の構造特性をまとめることができる。

- ①軸力図から、虹橋構造モデルと廊橋構造モデルもアーチ部材に生じる軸力は圧縮力であり、相欠き継ぎの接合部に生じる軸力は引張力である。
- ②曲げモーメント図から、橋の中央に下側が引張側、水平材と結合している位置におけるアーチ材が外側へ突き出る可能性がある。
- ③ 最大曲げモーメントから、虹橋構造モデルより廊橋構造モデルは破壊しにくいと考えている。

5. まとめ

本研究では、虹橋と廊橋の基礎データを分析し、虹橋より廊橋の方がアーチ構造として適切なスパンライズ比が用いられていることが分かった。また、虹橋構造モデルと廊橋構造モデルの骨組解析を行い、構造特性を探求した、虹橋構造モデルより廊橋構造モデルの最大曲げモーメントが小さくなることが分かった。これによって、廊橋は虹橋の進化を確認できた。今後、現存する中国組積木橋における一層深く研究を続けたい。

6. 参考文献

- [1]唐寰澄：「中国木拱橋」，中国建築工業物出版社，pp.38-42， 2010
- [2]陳沛山：「清明上河図」虹橋についての研究，pp.55
- [3]陳沛山：「清明上河図」虹橋についての研究，pp.58-59