

「清明上河図」虹橋についての研究

川 村 誠*・陳 沛 山**

A Study on a Wooden Bridge HONGQIAO in The Ancient Painting QINGMING-SHANGHE-TU

Makoto KAWAMURA* and Pei-Shan CHEN**

Abstract

Hongqiao was an arch shaped woodes bridge, which collapsed hundreds years ago and we can only see its beautiful form in a famous Chinese painting drawn in Northern Song Dynasty (A.D. 960-1127). Hongqiao was built in a very special structural system of lap beams, which is different from trusses, arches and bending structural system. In the present paper, the authors report an investigation results on the history of the Hongqiao Bridge, and analyze its geometrical dimensions and structural principle. By structural analyses, the authors investigate the distribution of internal forces, and represent its special structural characteristics.

Keywords : Qingming Shanghe Tu, Hongqiao, Wood Bridge, Arch, Wooden Arch, Chinese ancient bridge

1. はじめに

虹橋は、中国北宋時代（A.D.960-1127）の都の開封（現在の河南省開封市）に建てられたアーチ状の木造橋である。元 27 年（A.D.1290）頃、開封市は黄河の洪水被害を受け、虹橋が崩壊した¹⁾。そのため、我々は「清明上河図」という画卷でしかこの美しい橋を見ることができない。

「清明上河図」は長さ 528cm、幅 24.8cm の画卷であり、中国北宋時代の有名画家張澤端によって描かれたものである（図 1）。現在、中国本土、台湾、イギリス、アメリカ、フラン

ス、そして日本において 40 点以上の「清明上河図」が収蔵されている。張擇端は、鳥瞰図のように当時の中国の首都である開封の風景を生き生きと描いた。画卷の中には、500 人以上の人物、50 匹以上の家畜、そして 20 隻以上の船が存在する。画卷全体のハイライトとして、中心部にアーチ状の虹橋が描かれている（図 2）。この橋の上には人物、家畜、屋台などがあり、市場とコミュニティの場所となっているようで

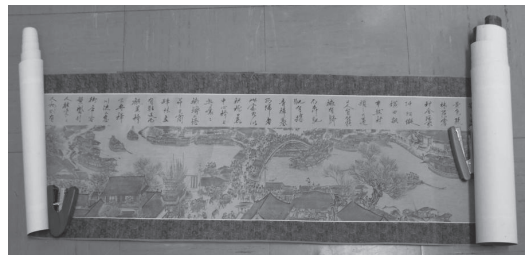


図 1 清明上河図の複製品

平成 21 年 12 月 14 日受理

* 大学院工学研究科建築工学専攻博士前期課程・1 年

** 大学院工学研究科建築工学専攻・教授

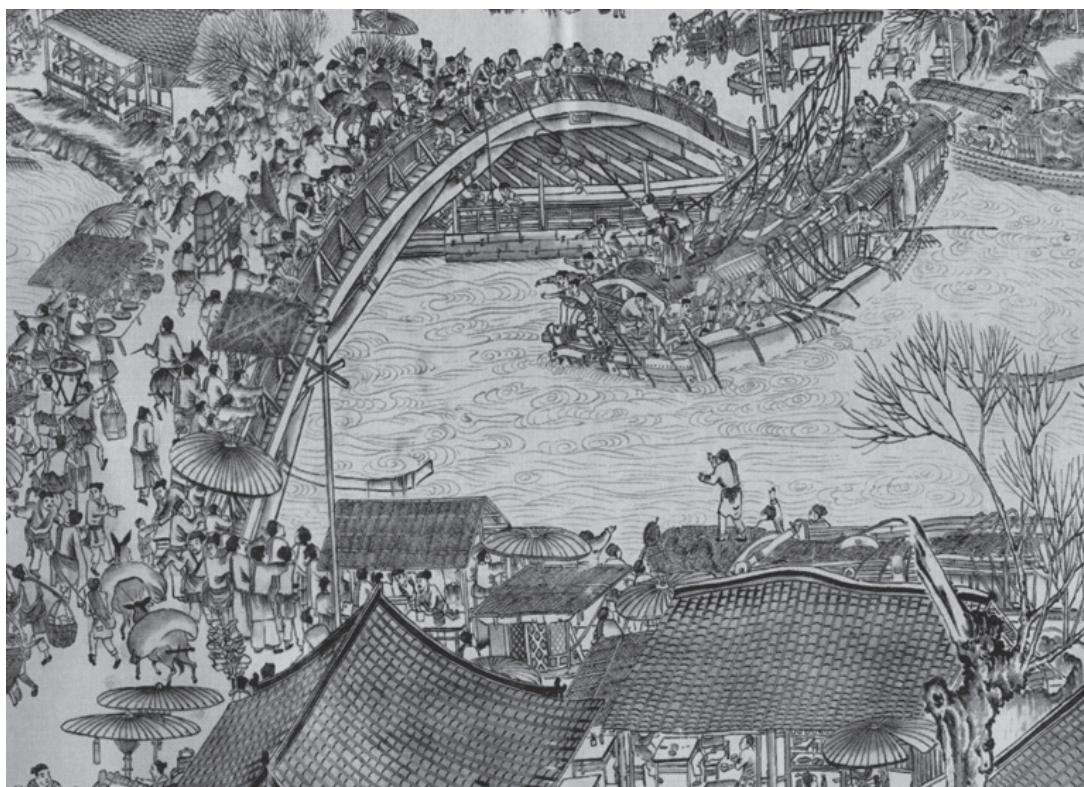


図2 清明上河図中の虹橋

ある。したがって、虹橋はこれらすべての荷重を支えるのに十分な安定性と強度を持ちながら大スパンを形成し、船がその下を自由に通れるように建設されたのである。

絵を観察すると、虹橋は赤い色の美しい虹形であり、汴河（べんか）の上に架けられている。汴河は中国南北の大運河を結び、当時の中国の首都とその他の地方、そして海外への主要な交通ルートとなっていた。

「清明上河図」は、中国宋代の政治、経済、都市、そして芸術などを研究するのに重要な資料となり、世界中に注目されている。開封市政府は、「清明上河図」のテーマパークを建設し、虹橋を再建した。但し、この新しい虹橋は、鉄筋コンクリート造であるので、虹橋本来の原理を反映せず、幾何学寸法も本来の虹橋と異なる。

虹橋の幾何学的規模、建設方法、並びに力学

原理は依然として謎のままである。虹橋は木造アーチ状橋であるが、その力学原理はアーチに近いものかについての研究は、中国におけるアーチの歴史に関わる課題となる。したがって、虹橋の歴史、幾何学的構成と構造原理を解明することが重要な課題となる。さらに、このような歴史的構造物についての研究を通して、現代構造デザインに啓発を与えることが期待できる。

資料収集と現地調査のため、筆者の陳は開封市を訪問した。画卷「清明上河図」に関する美術評論文献、宋代の文化、政治、経済、そして都市システムについての資料は数多く発見されたが、虹橋の構造技術と建設方法に関する史料は発見されなかった。

筆者の陳は虹橋についての研究を重ね、過去の論文で中国のアーチ状橋と虹橋の歴史、虹橋

の幾何学寸法の推定、虹橋の主架構の構成と力学特性について紹介した^{2, 3)}。これまでの研究では、各寸法は1つの値として推定されたが、本論文では様々な要因を考慮して、虹橋の各実寸法の範囲を推定する。また、接合部の詳細が見えないため、推定した実寸法を基に模型を作製し、画卷と比較して全体構成及び接合部の検証を行う。これにより、本論文では虹橋の主架構の構成、部材断面について新たに検証されたことについて研究結果を報告する。さらに、過去の論文で報告した虹橋の力学特性について改めて報告し、虹橋の構造原理を用いた現代空間構造についての研究成果を紹介する。

2. 虹橋の幾何学寸法の推定

2.1 円弧として推定する方法

虹橋の幾何学寸法に関する歴史資料は発見されていないが、「図書集成・職方典」などの史料では汴河の幅は5丈、水深は5尺という記録がある。「丈」と「尺」は、中国古代の長さ単位であり、時代や地方によってその基準が異なる。北宋時代の官制尺度と現在の長さ単位の換算方法としては、1尺は31.6cm、1丈は3.16mである⁴⁾。したがって、汴河の水面幅は16m、水深は1.6mであると推定できる。

「清明上河図」は、開封市の東部分を連続的に表現しているので、画家は幾何学的な透視原理を用いていない。そのため、透視手法と3次元幾何学計算方法を用いて虹橋の幾何学寸法を

確定することは大変困難なことである。

本研究では、その周辺の人物や物体の寸法の比率を割り出すことにより、橋の寸法を推定した。図3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、スパンとライズを推定する。その円弧の半径を R 、スパンを l 、ライズを h 、そして円弧の長さを L とすると、(1)式～(3)式の単純計算式を得ることができる。

$$R \sin \theta = \frac{1}{2}l \quad (1)$$

$$h = R(1 - \cos \theta) \quad (2)$$

$$L = 2R\theta \quad (3)$$

(2)式と(3)式から、次式を得ることができる。

$$\frac{L}{h} = \frac{2\theta}{1 - \cos \theta} \quad (4)$$

そして、各寸法の値は2.3節において推定する。

2.2 部材の太さを考慮した方法

虹橋の構造は、縦材と水平横材が密接して噛み合っている。これゆえ、全体形状は、部材の断面寸法に依存している。例えば、部材断面の直径が大きくなる、或いは材長が短くなると、全体曲率が大きくなりライズが次第に大きくなる(図4)。

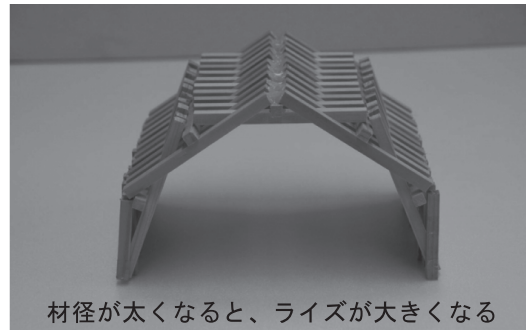


図4 ライズが材径に依存する

図5(a)に示すように、部材の節点は円弧上にあり、アーチに用いられている材木は同じ長さと同じ径であると仮定する。図5に示して

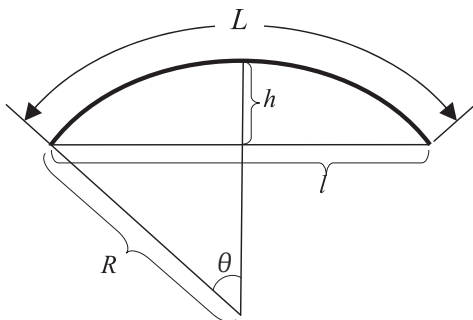


図3 幾何学モデル

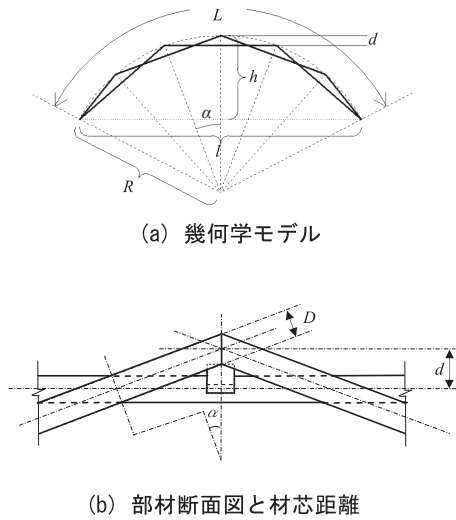


図5 形状と部材寸法による計算モデル

いる計算モデルを用いて、(5)式～(7)式に示すような幾何学関係が成り立つ。

$$L = 6\alpha R \quad (5)$$

$$d = R(1 - \cos \alpha) \quad (6)$$

$$\frac{L}{d} = \frac{6\alpha}{1 - \cos \alpha} \quad (7)$$

ここに、図5(b)に示すように、距離 d は材芯間の距離である。唐宋以前の時代から今日までの中国木造建築では相欠き継ぎや柄継ぎをよく使用している^{5, 6, 7)}。清明上河図を考察すると、水平横材の端部はアーチ部材に減り込んでいる様子が見える(図2、図11)。従って、

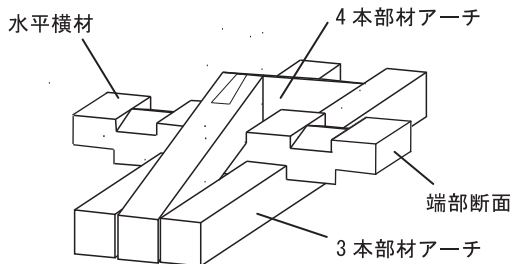


図6 部材断面のイメージ図

虹橋の角材接合にも適切な相欠き継ぎや柄継ぎを使用したことを推測できる。その接合部のイメージを図6に示す。

2.3 実寸法の範囲を推定する

前節で紹介した橋寸法の推定方法を用いて、虹橋の寸法範囲を推定する。最初に、弧長 L を求める。虹橋の欄干は、23区画に区切られている。「清明上河図」では、橋の欄干1区画には2～3人寄り掛かっている様子を描いている。そこから、欄干の幅を0.85～1.05m程度と推定し、弧長 L を次式のように推定できる。

$$L = \text{欄干のスパン} \times \text{欄干の枚数} \\ = 20.47 \sim 22.31m$$

次に、橋の幅 \bar{W} を推定する。画卷きの籠を担いでいる人の両手の幅を w 、画卷きの虹橋の幅を W とし、籠を担いでいる人の両手の幅を70～90cmとすると、橋の幅は7.70～8.69mと推定する。木材の本数は、橋の幅員方向に21本の部材が並んでいることから、部材1本の材径 D は次式で決められる。

$$D = \bar{W}/21 = 0.37 \sim 0.41m$$

続いて材芯間の距離 d を算出する。部材の断面欠損がなければ、距離 d は材径の約2倍以上である。清明上河図の考察結果及び文献^{5, 6, 7)}の実例を参考にして、虹橋の相欠き継ぎの断面欠損部分 e を部材断面の1/4程度とする。

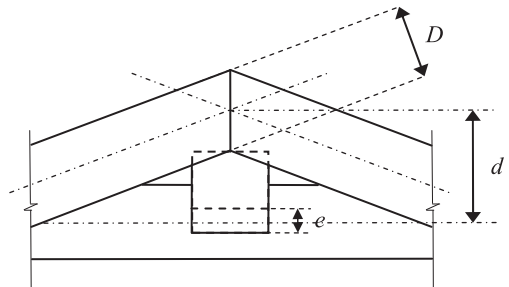


図7 部材断面図の拡大図

そして、材芯間の距離 d は次式のように推定できる。

$$d=2(D-e)=0.55 \sim 0.63m$$

次に、弧長 L と材芯間の距離 d の関係式（7）式を用いて、角度 $a=0.298 \sim 0.372rad$ を求めることができる。そして、2.2 節の（5）式、あるいは（6）式より、半径 $R=9.16 \sim 12.48$ を求めることができる。図 5（a）の幾何学関係より、材長 $lt=6.67 \sim 7.33m$ 、スパン $l=16.47 \sim 19.45m$ 、ライズ $h=4.61 \sim 5.23m$ を推定できる。最後に、橋全体の緩やかさを表現するため、スパンとライズの比率 $l/h=3.20 \sim 4.17$ を計算した。

以上の計算手順により、虹橋の実寸法の範囲を推定することができ、その結果を表 1 に示す。これまで推定した虹橋の主な寸法範囲を、下記の通りにまとめる。

- ①スパン： $l=16.47 \sim 19.45m$
- ②ライズ： $h=4.61 \sim 5.23m$
- ③材長： $lt=6.67 \sim 7.33m$
- ④材径： $D=37 \sim 41cm$

前述のように、材芯間の距離 d が大きくなること、あるいは材径 D が太くなると橋の全体曲率が大きくなる。表 1 の 値番号 A～E に示す材芯間の距離 d の最も小さな値 $0.55m$ は、最も細い材径 $D=0.37m$ と対応していることが分かる。

また、スパンとライズの比率 l/h の値が大きくなるほど、緩やかな勾配を形成する。材径 D を $0.37m$ とすると、表 1 の値番号 A-1、B-1、C-1、D-1、E-1 のスパンとライズ比 l/h の大きい値になっていることが分かる。

但し、宋代に建てられた建築物の柱に材径 $0.45m$ 、材長 $7.15m$ の材料が使われていたことが文献 5) に記載されており、当時はこのサイズの材料が確保できていたことが推測される。このことを考慮すると、表 1 の値番号 A-1、B-1、C-1、D-1、E-1 に示す材長 lt のうち、材

表 1 推定した寸法の値

番号	L	D	d	lt	l	h	l/h
A-1	20.47	0.37	0.55	6.70	17.37	4.61	3.77
A-2	20.47	0.38	0.57	6.69	17.11	4.78	3.58
A-3	20.47	0.40	0.60	6.68	16.84	4.94	3.41
A-4	20.47	0.41	0.63	6.67	16.47	5.15	3.20
B-1	20.93	0.37	0.55	6.86	17.90	4.63	3.87
B-2	20.93	0.38	0.57	6.85	17.63	4.80	3.68
B-3	20.93	0.40	0.60	6.84	17.37	4.96	3.50
B-4	20.93	0.41	0.63	6.82	17.01	5.17	3.29
C-1	21.39	0.37	0.55	7.02	18.42	4.64	3.97
C-2	21.39	0.38	0.57	7.01	18.16	4.81	3.77
C-3	21.39	0.40	0.60	7.00	17.91	4.98	3.60
C-4	21.39	0.41	0.63	6.98	17.55	5.19	3.38
D-1	21.85	0.37	0.55	7.17	18.94	4.65	4.07
D-2	21.85	0.38	0.57	7.16	18.69	4.83	3.87
D-3	21.85	0.40	0.60	7.15	18.43	4.99	3.69
D-4	21.85	0.41	0.63	7.14	18.08	5.21	3.47
E-1	22.31	0.37	0.55	7.33	19.45	4.66	4.17
E-2	22.31	0.38	0.57	7.32	19.21	4.84	3.97
E-3	22.31	0.40	0.60	7.31	18.96	5.01	3.79
E-4	22.31	0.41	0.63	7.29	18.62	5.23	3.56

長が $7.15m$ より短いものを選択することになる。

総合的に分析した結果、表 1 で推定した値の中から C-1 の値が虹橋本来の寸法に最も近いと考えられる。よって、スパン $l=18.42m$ 、ライズ $h=4.64m$ 、材長 $lt=7.02m$ 、材径 $D=0.37m$ が最も実寸法に近いと推定した。

3. 虹橋の構造原理

3.1 虹橋の主架構の構成

図 8 に示すように、虹橋は 3 本部材アーチと 4 本部材アーチの 2 種類のアーチで構成されている。この 2 種類のアーチは 1 種おきに交互に立てられている。3 本部材アーチには、1 本の水平材を中央に配置し、他の 2 本は八文字形の斜材となる。4 本部材アーチのうちに 2 本の部

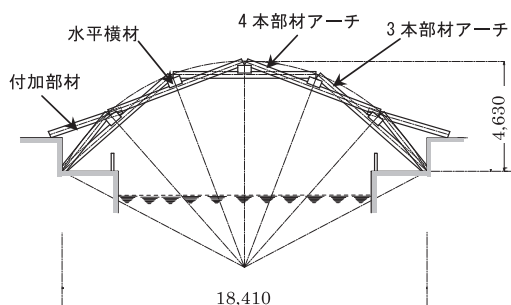


図8 虹橋の構造原理と断面寸法

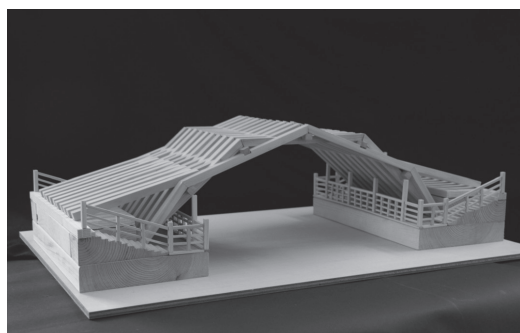


図9 作製した模型

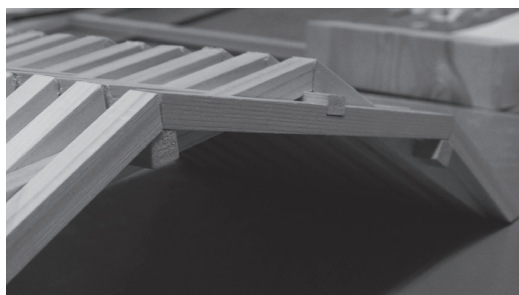


図10 作製した模型の接合部

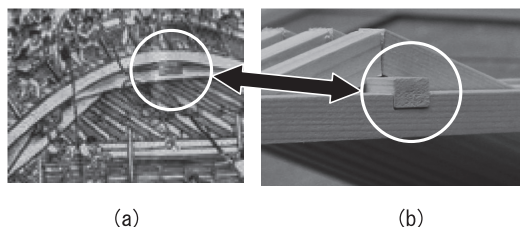


図11 清明上河図と模型の部材端部

材は中央において接合している。5本の水平横材はアーチ面と垂直して配置され、アーチ材と十字形相欠き継ぎで噛み合っている。その接合部は図6に示している。上記接合部の相欠きや柄継ぎは骨組の回転自由度と横変位を拘束し、構造全体の安定性を保つことに役立つ。

虹橋の主要な構造部材に釘は使われなかったと考えられる。但し、釘を使って路面仕上げ板を固定した可能性がある。

本研究では、2.3節で推定した実寸法を基にして模型を作製し、全体構成及び接合部の検証を行った(図9)。模型検証の結果、4本部材アーチと3本部材アーチが水平横材と噛み合うことができ、図6で推測した部材接合方法も合理的な構造であることが分かった(図10)。模型では、相欠き継ぎの手法を用いたことによって、接着剤を使わなくても安定した構造になることを検証できた。図11(a)に示す清明上河図に描かれた水平横材端部と、模型の水平横材端部

(同図(b))及び図6を参照すると、同じ長方形の形を成している。このことから、図6で示している部材端部は正しいことが証明される。

3.2 虹橋の力学特性

アーチの力学的特徴は、内部に生じるスラストと荷重で釣り合い、曲げモーメントが最小限度になることである。等分布荷重を支える理想的なアーチ形状は、荷重の分布方式によってカタナリーまたは放物線に近い曲線であり、内部に生じる曲げモーメントがゼロに近いものになる。そして、虹橋はアーチの形状を持つが、その力学特性がアーチに近いかを力学解析手法により解明することが必要である。

900年前の中国の材料と荷重状態を絵一枚から正確に推定することは大変困難である。本研究では当時の応力や変位を厳密に解析することとを避け、橋の主架構にスラストと曲げの確認とその一般的な力学特性を調べることを目的と

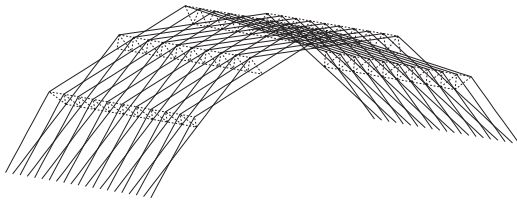


図 12 解析モデル図

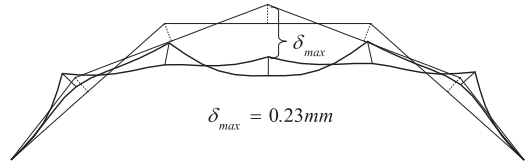


図 13 構造変形イメージ図

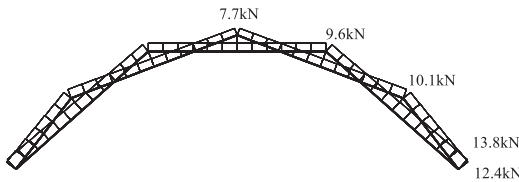


図 14 軸方向力分布図

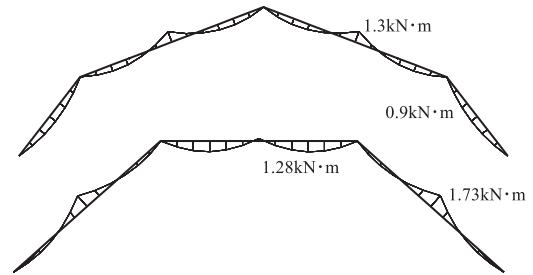


図 15 モーメント分布図

し、境界条件や荷重条件そして材料特性を適切に仮定して、図 12 に示す解析モデルを用いて静的力学解析を行った。

解析モデルでは、全ての部材は $42 \times 42cm$ の同断面とする。但し、木材は典型的な異方性材料である。ここに、主架構の一般的な力学特性を調べる解析を単純化するために、木材の年輪方向の剛性差を無視し、各部材を等方性材料と仮定する。現在の松の木の機械特性を参照して、弾性係数は $10^6 N/cm^2$ 、比重は $6 \times 10^{-3} N/cm^3$ と仮定する。主架構の自重とは別に、橋面全面に作用する等分布荷重を $1.5kN/m^2$ と仮定した。ここに、手摺の力学効果と荷重効果は無視した。

全ての部材は軸力を伝達できる梁材とし、そのねじれ回転を拘束する。接合部の相欠き継ぎや柄継ぎの拘束を考慮し、構造全体のアーチ面外方向の自由度を拘束する。構造体の変位は微小であること、当時の技術で大木を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する。そして、アーチ部材の支持点もピン接合とする。

構造体の木材と木材は密接して接合されている。但し、解析モデルでは部材の芯線を用いてモデル化されたため、材芯と材芯の間に距離が生じる。接合部をモデル化するため、水平横材を省略して、代わりにバネリンクでアーチ材をリンクする。図 12 に示す解析モデルでは、実線はアーチ部材、点線はバネリンクを示す。材木の直径方向の変位が非常に小さいことを想定して、バネリンクのバネ定数を大きく設定して解析を行う。

静的力学解析の結果、構造変形のイメージを図 13、軸方向力とモーメントの分布をそれぞれ図 14 と図 15 に示す。この解析結果より、下記の力学特性をまとめることができる。

- 1) アーチ部材に生じる曲げモーメントは正と負の両方向に現れ、同等材質の単純梁の曲げモーメントより小さい。

- 2) 水平横材と交差している位置において、アーチ材が外側へ張り出す傾向があり、これは上記のモーメント分布特徴の原因となる。但し、外側へ張り出す挙動を拘束するために、接合部にはロープまたは鉄の留め具により水平横材とアーチ材を拘束して一体化することが必要である。
- 3) アーチ部材に生じる軸力は圧縮力である。大きい軸方向力は下部に生じ、小さい軸方向力は上部に生じるが、その差は著しくない。

虹橋の構造システムは、部材レベルで考察すると梁の特性を持つ。形状と軸方向力の分布を考察すると、虹橋の力学特性はアーチに近いと言える。トラスやスペースフレームの視点から考察すると、部材が2層を渡って交差しているが、上弦材と下弦材が存在しない。即ち、虹橋の構造システムは純粋な曲げでなく、完全なアーチとも言えない。但し、アーチ、トラスやスペースフレームの幾何学特性を持っている。

虹橋の構造システムは曲げ、アーチ、トラスやスペースフレームとして分類できず、大変独特な構造システムである。唐寅澄は中国語で「叠梁」システムと名付けた¹⁾。筆者らは「叠梁」を“Lap-Beam”と英文に翻訳して名付けた^{2, 3)}。

4. 現代空間構造への応用の可能性

筆者らは、虹橋の特殊な構造原理を現代空間構造へ応用することを研究している。ここに、その途中成果を報告する。現段階では、虹橋の構成原理の利用方法を研究しているが、その力学特性や生産性についての分析を行っていない。

まず、虹橋の水平横材を延長し、アーチ状部材を適切に配置することにより円筒型の空間構造を創出できる(図16)。ここに、この構造体を“Lap-Beam 円筒”と呼ぶ。直線状の水平横材をアーチ状にすると、ドーム型の構造を造り出せる。このドームをLap-Beam ドームと呼ぶ。

ドームの模型を図17に示す。

このLap-Beam ドームを考察すると、その構成特徴は中国や日本の調理用道具の箆に似ている。箆や籠を作る動作は中国語では「編」と言い、これは「無脚橋」の建造過程を「編木為之」と記録された理由だろう。ここに、「編(編む)」は構造の外観形状や部材の組み方が編まれた箆に似ていることを示し、竹や木の枝で製作された箆に存在している自己釣り合い力を考慮していなかったと考える。当然、本論の研究対象には自己釣り合い力が存在しない。箆の組み方に似ているこの理由で、筆者らはLap-Beam ドームの愛称として「ザル・ドーム」と呼ぶ。

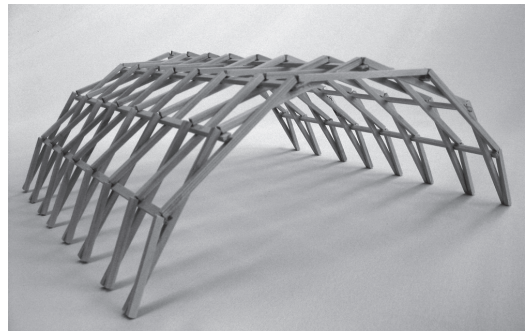


図16 Lap-Beam 円筒

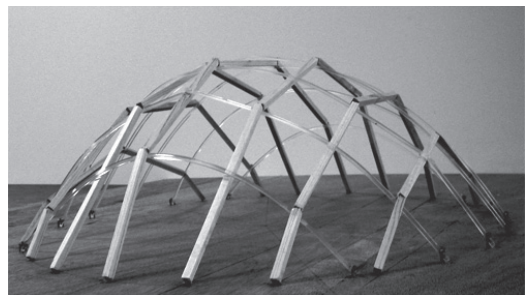


図17 Lap-Beam ドーム

5. 結論

本論文では、虹橋の幾何学寸法を計算し、スパンは18.41m、ライズは4.63m、材長は7.01m、材径は0.37mと推定した。

推定した寸法を基に模型を作製し、全体構造

と接合部の検証を行い、本研究で推測した接合方法が合理的であることが分かった。

近似的に力学解析を行い、虹橋の一般的な力学特性を確認した。虹橋のアーチ部材には軸方向圧縮力と曲げモーメントが生じるが、曲げモーメントが正と負の両側に分布しているため、同様の単純梁と比べてモーメントが小さいことが分かった。虹橋の構造システムは曲げ、アーチ、トラスやスペースフレームとして分類できないが、部材レベルで考察すると梁の特性を、架構形状と部材軸力を考察するとアーチの力学特性を持っていることが分かる。また、アーチ、トラスやスペースフレームの幾何学特性を持っている。

さらに、虹橋の構造原理を現代空間構造へ応用する可能性を研究し、応用例として Lap-Beam 円筒と Lap-Beam ドームを提案した。但し、提案した空間構造の応用例の力学特性についての研究は今後の課題になっている。

虹橋の使用材料、建設方法、接合部の詳細、力学特性など数多くの課題が残されている。今後、一層努力して研究を続けていこうと考えている。

謝 辞

この研究に協力して下さった中国河南大学・古建園林設計研究院の張家泰教授ならびに同校建築土木学院の先生方に心から感謝いたします。本研究に携わった陳研究室の卒業研修生の皆様に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 唐寰澄：中国古代橋梁，文物出版社，pp.64-78, 1987
- 2) 陳沛山，大川原恵美，原田恵美子，細川美穂：構造工学論文集 Vol.54B, 社団法人日本建築学会, pp.259-265, 2008
- 3) Pei-Shan Chen: A Study Report on an Ancient Chinese Wooden Bridge Hongqiao, Structural Engineering International, pp.84-87, 2008
- 4) 肖旻：唐宋古建筑尺度規律研究，東南大学出版社，2006
- 5) 梁思成：建築文萃，SDXJoint Publishing Company, p168, pp.263-264, 2006
- 6) 梁思成：清式營造則例，清華大学出版社，2007
- 7) 梁思成：清工部「工程作做法則例」図解，清華大学出版社，2007