

錦帯橋の構造の独自性について

松村 博¹

¹ 正会員

E-mail: hmatsumura@leto.conet.ne.jp

錦帯橋は世界的にみても稀有の構造物である。上部工に適用された独自の木構造のアーチを連続させている点も他に類を見ない構造であるが、それらを支える下部工も独特の形状と工夫が組み込まれている。さらにそれを 270 余年にわたって急流から守ってきた綿密な護床工の存在も特筆すべき構造である。これらは単独に評価されるものではなく、一体として機能していることを評価して、橋全体の構造の価値を見直す必要がある。個々の構造の独自性については、過去に多くの論考によって証明されてきたが、本稿ではそれらを総合的な視点から見直し、再評価を行う。これによって錦帯橋の独自性を再評価する視点が得られるものと考えている。それが錦帯橋の世界的な評価を高めるきっかけになれば幸いである。

Key Words: Kintai-kyo, Timber arch bridge, Cantilever structure, Spindle-shaped pier, River bed protection works, Boat transport, 17th century, Before 1950

1. 錦帯橋の構造の特徴

錦帯橋は延宝2年(1674)以来、昭和25年(1950)までの構造を変えることなく、引き継がれてきた。その構造の独自性は以下の3点に集約できる。

- ① ライズ比の小さい、長スパンの木造アーチを連続させていること
- ② 比較的幅が狭く、流水抵抗が少ない紡錘形断面の橋脚を用いていること
- ③ 橋の上下流に河床勾配に合わせた綿密で広範囲な護床工を施していること

そして、錦帯橋の設計にあたっての命題は以下の通りであったと考えられる。

- ・ 上部工の下端を洪水位より高くすること
- ・ 通行者の負担を極力少なくする勾配にすること
- ・ 主要なスパンを可能な限り長くすること
- ・ 扁平なアーチ構造の水平力に対応すること
- ・ 橋脚の河積阻害をできるだけ小さくすること
- ・ 水流から受ける水圧を小さくすること
- ・ 洗堀による影響を小さくすること
- ・ 舟運を妨げないこと

2. 多径間のアーチ橋

(1) 独自のアーチ構造 (文献1)～(8)参照)

比較的短い木材を巧みに組み合わせてアーチを構成している構造は世界的にも独自のものである。

寛文13年(1673)に創建されたとされる錦帯橋では、元禄12年(1699)の図面によると、スパン約40mのアーチを組み上げるのに刎木材として最長材:3間半(6.4m)、6寸角、最大断面材:1尺2寸×6寸、長3間(5.5m)が用意されている。これらの直線部材は適宜楔木を入れてテーパを付けながら巧みにアーチ形状に組み上げられていく。そして9番桁の先端に大棟木を落とし込み、1層目のアーチが完成する。さらに小棟木を重ねてアーチに厚みが加えられる。

計11段の桁は鼻梁と後梁を組み合わせることによって軸力と曲げによる軸方向の剪断力が伝えられるようにできるだけ一体として抵抗力が発揮できるように工夫されている。さらに、桁どうしを糸で止め、おそらく桁の間には太柄をいれ、そして要所を巻金で締めて一体化され、アーチとして機能させている。そしてアーチ側面に鞍木、助木が入れられて補強されている(図-1参照)。

この構造は刎橋構造の進化したものと考えることが可能である。刎橋は刎木を長くするとスパンを伸ばすことは可能であるが、大きなカウンターウェイトを必要とするため、実用的には単径間の橋への適用にとどまる(注-1)。連続させるためには川中に幅の広い橋脚を造る必要があり、多径間の橋への適用は難しかった。

錦帯橋のアーチ構造は、両端においては刎橋の形態を持っており、直線部材を巧みに組み合わせながら突き出して、最終段階でキーストーン（要石）に当たる大棟木を落とし込むことによって完結させている。曲げ部材であった刎木を圧縮部材に変化させたことになる。刎橋が突然変異的に進化を遂げた構造であると言ってもよい。

アーチ構造の組立には当然支保工が必要であるが、渇水期の錦川ではその施工は可能であった。

木造アーチ構造は錦帯橋が架設されるまでは国内になかった技術である。中国でも「清明上河図」に画かれた宋代の汴京の虹橋（注-2）のアーチ構造は、以降にも若干の類似構造は見られたが、錦帯橋とはアーチの構成方法が異なっており、錦帯橋の参考にされた形跡はない。また、ヨーロッパにおいても同様の構造は確認できない。

錦帯橋がアーチ構造であることは綿密な計算と現場測定によって確かめられている。昭和28年の架け換え直後の載荷試験や平成13年から15年の旧橋と新橋を用いた大規模な載荷実験によってアーチの載荷に対する変形はもちろん、震動モード、固有振動数、橋の剛性の経年変化、巻金、太柄、録のアーチ構造への有効性、鞍木や助木の剛性への貢献度、高欄の効果など貴重なデータが得られている。そしてこれらの載荷試験の結果と解析値との比較がなされている。近年では解析技術の向上によってより厳密な計算が可能になっており、各部材にまで分解してモデル化したFEM解析などが行われ、載荷実験値に近い結果が得られている（文献7）8））。

（2）多径間のアーチ構造

アーチ構造は古い歴史があり、中国においてはライズ比の小さいアーチとして趙州橋のようにスパン40mに近い石造アーチが8世紀に、上述の虹橋のようにスパンがおよそ25mの木造アーチが12世紀に実用化されていたが、単径間への適用にとどまっていた。

そして、石造アーチを連続させた場合は、ライズ比を小さくした橋では橋脚幅を大きくして水平力に対応する（結果として河積阻害率が大きくなる）か、ライズ比を2分の1近くまで大きくして水平力を小さくする方法（橋面勾配が大きくなる）によっていた。

上の課題を全く異なる構造によって克服したのが錦帯橋の構造である。

錦帯橋の上部工には、200m近い川幅をほぼ5等分して、中央部にスパン約40mの3つのアーチ橋を配置して両側にはほぼ同じ長さをもつ桁橋が適用されている。

アーチ部のライズ比は8分の1程度と、かなり扁平なアーチになっている。扁平なアーチを用いると端部に大きな水平力が発生するため橋脚上でそれを相殺させる工夫が必要となる。錦帯橋では3番桁（刎木）までを橋脚内に固定するためある程度の橋脚幅を確保しながら、比較的薄い隔石を介して水平力をバランスさせるようになっており、橋脚幅をできるだけ薄くして、河積阻害を

少なくする工夫がなされている。さらに、アーチ橋からの水平力が伝えられる桁橋では主桁の上下に肘木（刎木）と楔型の重ね桁を入れて補強し、水平力を橋台へ伝達する工夫が見られる（図-2参照、注-3）。

3. 紡錘形の石積橋脚

錦帯橋が架かる錦川は日本特有の急流河川で、洪水時には流量が急激に増す。また、河床には砂礫層が厚く堆積しており、基礎の施工が極めて難しい条件下にあった。また、スパン40mに近い上部工からの鉛直力はもちろん、アーチからの水平力にも対応できる基礎、躯体を持つ橋脚の構造が求められた。一方、橋脚の体積が大きくなると、それに応じて水流による圧力が大きくなる。

これらの外力に対して滑動や転倒が発生しないためにある程度の重量があり、縦横共に末広りの形状を持つ石積橋脚が考案された。その基本は城郭の石垣技術にあると考えられるが、激しい水流に耐えるための工夫も加えられた。橋脚外側の石積には比較的大きな間知石を使い、中には栗石を詰め、石積の隙間を漆喰で埋め、主要な石どうしは千切りで連結を強化している。

渇水期には水位が低下し、簡易な締め切りによって、2～3mの掘削が可能であったため、可能な範囲で強固な石積を施工することができた。

その結果、河積阻害率は14%程度となった。当時の一般的な木柱、石柱桁橋では阻害率は10～11%で、それらと比較してもそれほど大きくはない（注-4）。

また、紡錘形にすることによって流水圧、塞き上げ効果を少なくし、近傍の洗掘効果も大きく低下させており、さらに流木などによる衝撃も緩和されることになる。

ちなみに死活荷重満載時のアーチ端の水平力は120tf、洪水時の流水圧はおよそ17tf、塞き上げ高は50cmでいどと概算される（注-5）。これに対して石積橋脚の自重は約800tfとされており、転倒や滑動に対する安全性は十分確保されている。

4. 綿密な護床工

錦帯橋の上下流には広範囲にわたって綿密な護床工が施工されている。地盤条件から基礎の深さが十分に確保できないために、洗掘を受けると致命傷になる。実際、創架直後に洗掘が原因とみられる事故で橋が崩壊したと伝えられている。自然地形の状態であると洪水時の橋脚周辺には8～9mの深さの洗掘が生じ、その影響範囲は15m程度に及ぶ可能性がある。

急流河川に架けられた重要な橋の周辺に護床工が施されている例は見られるが、急流を緩和するために下流側に落差工が設けられていることが多い（注-6）。錦川ではこの地域の重要な物資輸送手段としての舟運を確保する必要があり、舟運を妨げる施設は設けられていない。

そのような条件下で、500 分の 1 程度の勾配をもつ河床には 2~3 段の敷石が施され、場所によっては 1.5m ほどの丸太杭によって根固めがなされている。その範囲は上流へ約 20m、下流へは約 50m に及ぶ。下流側へ広いの

は下流側の勾配が大きくなっていることや橋脚の堰上げ効果によって水流が速くなるための対策である。このような入念な護床工によって 276 年間にわたって橋脚の安定が保たれてきたことは特筆すべきことである。

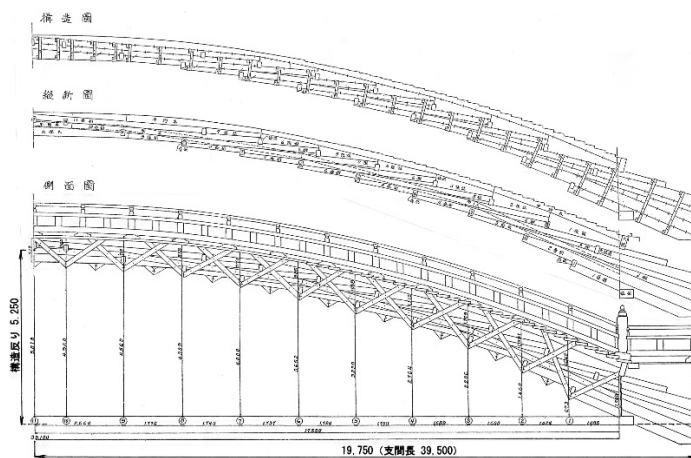


図-1 アーチ橋（中ノ反橋）構造図：文献3）より

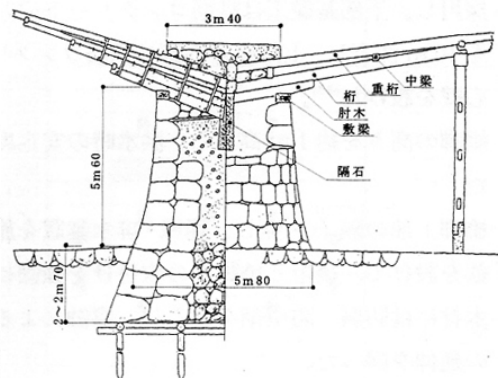


図-2 橋脚断面図：文献6）より

注-1：刳橋

刳橋は甲信越地方などの山岳地域に数多く架けられていた。基本的に1径間で、渓谷を渡る。その構造が資料などに残されているものは少ないが、錦帯橋の架設時に架けられていたと考えられる橋には、愛本橋と甲斐・猿橋があり、そして、時期的に少し遅れるが、スパン長が100mほどに達する井川の刳橋のような橋もあった（文献9）10）11）。主要な橋の橋長、支間長は以下のものであった。

- ・愛本橋：橋長 206 尺 (62.4m)、支間長約 150 尺 (45m)、元刳木一長 7 間 (12.7m)、1 尺 7 寸 (51 cm) 角（図-3）
- ・甲斐猿橋：橋長 30.9m、支間長 23.6m、一の枯木(南側)一長 6 間半、末口 1 尺 8 寸
- ・井川刳橋：（元禄期）橋長約 85m、支間長約 75m、（文政期）橋長約 100m、支間長約 85m

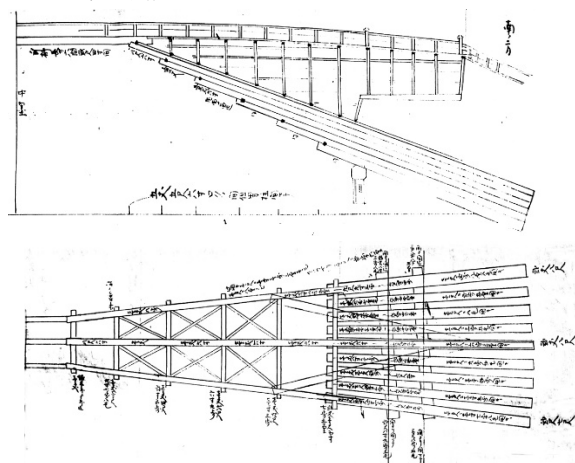


図-3 愛本橋の構造図

（『愛本橋絵図』金沢市立玉川図書館蔵より）

注-2：虹橋

木造アーチ橋としては、北宋の首都であった汴京の賑わいを

活写した「清明上河図」に描かれた虹橋が記録上最古のものと考えられる。虹橋の基本構造はアーチであるが、トラスに近い構造であると言える。主部材を、横梁を介して一定の間隔を持たせて突合せて繋ぎ、アーチを構成しており、支点間距離が約 25m、ライズは約 5m の扁平なアーチ橋であったと推定されている。

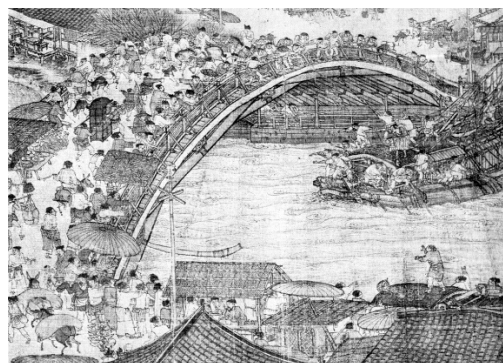
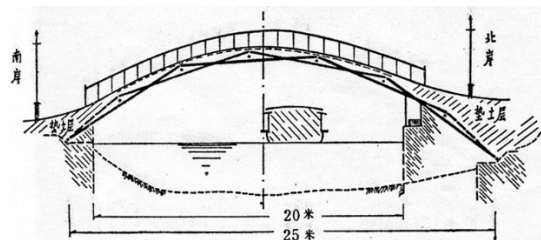


図-4 「清明上河図」に描かれた虹橋¹³⁾



図二 虹橋簡図

図-5 虹橋の基本構造¹⁴⁾

注-3：水平力への対応

上部工からの水平力に対応するために重量のある石積橋脚が適用されたが、基底部を大きく、工事が可能な範囲で根入れを深くした。端部が拘束されるアーチ橋では端部に大きな水平分

力が発生する。計算上はライズ比が低いほどその値は大きくなることになる。文献4)に錦帯橋の橋体に発生する断面力の概略計算がなされているが、それに従って水平力を概算した。

アーチ軸線を次のような放物線 $y=(4f/l^2)x(1-x)$ に近いものと仮定すると、水平力の影響線は下式のようになる。

$$X_a=(5/8f)(x-2x^2/l^2+x^4/l^3)$$

ただし、 l ：支間38m、 f ：サグ5m とする。

死活荷重を等分布と仮定し、1本のアーチ当たり死荷重を300kg/m、活荷重を375kg/mとして、影響線を積分すると、24tfとなり、アーチ5本では、120tfとなる。

アーチからの水平力は第2、第3橋脚ではほとんど相殺されるのであまり問題ではないが、第1橋脚と第4橋脚には水平力が伝えられることになるからそれに対抗する耐力が必要であった。

昭和25年以前の橋では隣接するアーチを取り除いた時などには、アーチ端を支えている隔石などに局部的に大きな水平力が作用して、隔石が転倒する可能性もあるため、そのアーチの中央に支柱を立てて荷重を分散して水平力を軽減する処置がとられた。昭和9年の架け換えでは桁中央に末口八寸の杉丸太3本を河床に2尺ほど建て込んで梁や筋違を配した仮の橋脚が建てられた²⁾(写真-1)

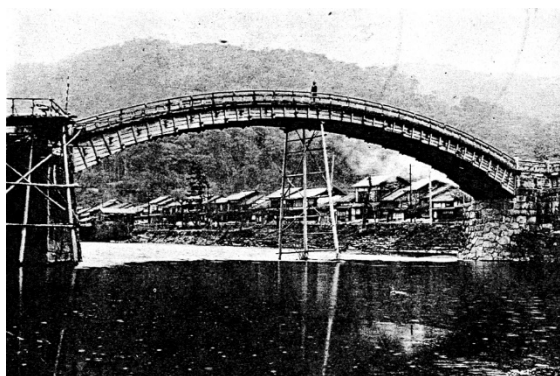


写真-1 工事中の仮支柱（昭和9年）：文獻2)より

注-4：河積阻害率＝橋脚幅の河川流水幅に対する比

錦帯橋： $(0.4m \times 6 \times 2 + 5.5m \times 4) \div 190m \approx 14\%$

江戸期の木柱橋－両国橋： $(0.7m \times 27) \div 170m \approx 11\%$

石柱橋－三条橋： $(0.7m \times 18) \div 126m \approx 10\%$

江戸期の木橋のスパンは最大でも7間ほど、平均では3～4間程度で、阻害率は10%程度であった。それらと比べても錦帯橋の阻害率はそれほど大きなものでない。

注-5：紡錘形断面-流水圧、塞き上げ効果、洗掘

流水抵抗をできるだけ小さくするために紡錘形断面が考案された。洪水時に橋脚に作用する水平力としては、流水圧と塞き上げ効果による水圧があり、洗掘が発生した場合には下流側に根入れの減少が生じてその分水平力が増加する。

通常、橋の設計にあたっては、以下のような推定がなされる。
・流水圧－橋脚などが水流によって受ける水平力は「道路橋示方書」（平成30年1月適用）¹⁵⁾の次式によって計算できる。

$$P=K \cdot v^2 \cdot A \quad v: \text{最大流速}, A: \text{橋脚の投影面積}$$

・堰上げ効果－橋脚があることによって水が堰上げられ、その量が水圧として橋脚に作用する。通常はD'Aubuisson式によって計算される¹⁶⁾。

・橋脚周辺の洗掘の推定－橋脚周辺に河床石敷（護床工）がなく、自然地形であった場合に橋脚周辺にどれほどの洗掘が発生するかは、文献16)などによって推定できる。

いずれの計算にあたって、紡錘形断面を持つ橋脚は、係数が小さく、値は小さく見積もられることになる。

注-6：護床工と落差工

洗掘防止のための河床石敷きは京・三条、五条橋などに先例があった。京・三条、五条橋は天正18年(1590)に豊臣秀吉の命で石柱橋として架けられたが、五条橋は正保2年(1645)に総石造りの橋になったときに川床に広い石敷きが施されたとされる。また三条橋でも寛文7年(1667)の『京三条大橋指図』によると、橋の上下流は10間ほどの石敷きで固められ、その下流には3尺の水落が設けられていた¹⁷⁾。現在の鴨川では多くの落差工(堰)が作られており、護床工と落差工とが組み合わせられた可能性が高い

<参考文献>

- 1) 平澤郷男：岩国錦帯橋に就て 建築雑誌, 昭和2年10月
- 2) 関谷新造：錦帯橋架換工事 工事画報 pp. 171～176, 昭和9年10月及びpp. 251～255, 同11月
- 3) 大野唯糊：錦帯橋の沿革と構造 土木学会誌第22巻第5号, 昭和11年5号
- 4) 青木楠男、佐藤武夫：錦帯橋の再建 建築雑誌 Vol. 68 No. 801, 1953年8月
- 5) 品川資：名勝錦帯橋再建記, 昭和30年4月
- 6) 岩国市：名勝錦帯橋架替事業報告書, 平成17年3月
- 7) 第5回木の建築フォーラム 岩国, 2004
- 8) 岩国市：究極の名橋錦帯橋, 平成25年3月
- 9) 松村博：錦帯橋、愛本橋、甲斐の猿橋、日光・神橋、中津橋、「日本百名橋」, 1998年8月
- 10) 山梨県大月市：名勝猿橋架替修理工事報告書, 昭和59年10月
- 11) 武部健一、松村博：井川刳橋の歴史とその構造解析 土木史研究講演集 Vol. 29, 2009
- 12) 方擁：中国の木造アーチ橋と日本の錦帯橋 第2回錦帯橋国際シンポジウム報告書, 2010年11月
- 13) 唐寰澄編著：中国古代橋梁, 1987年3月
- 14) 杜連生：宋《清明上河図》虹橋建築的研究 文物 227号, 1975年4月
- 15) 国土交通省：「橋、高架の道路等の技術基準」（道路橋示方書）の改定について, 平成29年7月
- 16) 国土技術研究センター：河川を横過する橋梁に関する計画の手引き(案), pp. 80～88, 平成21年7月
- 17) 松村博：京の橋物語 pp. 129～141, 1994年9月

(2018.4.9 受付)