

錦帯橋の構造特性に関する歴史的考察*

Historical Study on the Structural Characteristics of the Kintai Bridge

依田照彦**，赤木領太，森本博行***

By Teruhiko YODA, Ryota AKAGI, Hiroyuki MORIMOTO

本研究では、歴史的な木橋である岩国錦帯橋を対象に、実際に使用されていた材料の強度試験、現地での第二橋の実橋実験を行い、有限要素法を用いた数値解析シミュレーションの成果をもとに、木組構造における鞍木、助木の効果について構造力学的な見地から検討することを目的とする。錦帯橋の構造特性を歴史的観点から考察することは、錦帯橋の構造特性の解明のみならず、錦帯橋の維持管理・補修を考える上で大いに価値があると思われる。

1. はじめに

錦帯橋は山口県岩国市を流れる錦川の横山地区と錦見地区とを結ぶ木造橋梁で 1673 年に創建された。錦川は水の流量が多く流速が速いので、橋脚の数を最小限に抑える必要があった。このためアーチ形状の橋梁形式が採用されたと考えられる^{1)~3)}。その結果、錦帯橋の木組構造は他に類を見ない構造となった(写真-1, 図-1)。試行錯誤の結果到達したアーチ構造も歩道橋としての用途を考えると剛性が少し不足していたため、1678 年に補強部材として鞍木と助木が取り付けられた。木造アーチ橋として、構造的な面から見ると、この鞍木と助木の取付が力学的にもデザイン的にも大きな価値を持っていると考えられる。表-1 に錦帯橋上部構造の改良点を示す。小さな改良点は架替のたびになされてきたと思われるが、大きな改良は 1678 年の鞍木・助木の取付である。また、鞍木の形が創建時から変化してきた点にも注目したい。

2. アーチ構造の形成

対象橋梁は前述の五連の岩国錦帯橋である。このうちの中央の第二橋を検討の対象とした。この第二橋は、反り高 5.184m、支間長 35.10m のアーチ橋であり、5 本のアーチリブより構成されている。図-1 に示すように各アーチリブは、片側 11 本の桁を基本とし順次せり出されており、勿ね木のすき間には、三角形の楔を入れ要所を巻金で結束し、アーチを形成している。さらに桁同士はダゴやかすがいで一体化されている。創建時の図面が存在しないので確たる証拠はないが、創建時から巻金・楔は存在していたものと類推できる。創建時に取り付けられた鞍木の形状は V 字型そのものであり、現在のものとは違っている¹⁾。

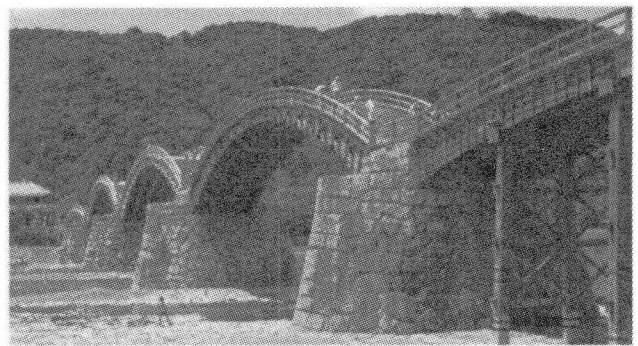


写真-1 錦帯橋 (1953 年建設)

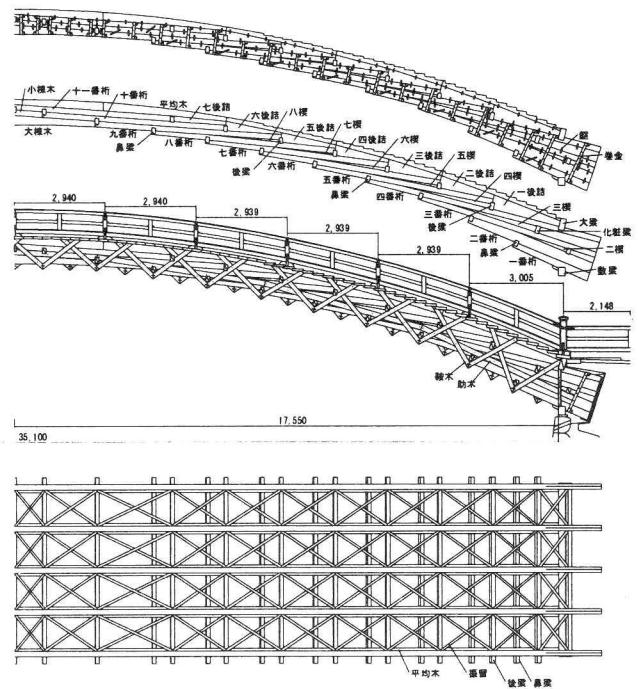


図-1 錦帯橋の木構造³⁾

* keyword : 木橋, 歴史的構造物, 現地計測

** フェロー 工博 早稲田大学教授理工学部社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

*** 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻

振留や筋違の機能をより明確にするため改良・改善がなされた結果、現在の形状に至ったと思われる。棟木は本橋唯一の左右で連続した部材となっている。

3. 鞍木・助木の役割

鞍木と助木の構造力学的な特性を調べるために、

- (1) 鞍木・助木除去実験
- (2) 60tf分布荷重載荷実験
- (3) 解体実験

の3つの実験を行った。ひずみは十番桁、九番桁に12箇所、端部に六箇所ひずみゲージを貼付して測定した。解体実験の時のみ、六番桁から三番桁に六箇所ずつ、端部に六箇所ひずみゲージを貼り、ひずみを測定した。実験中は昼夜を問わずインターバルをとりひずみデータを取り続けた。ひずみを測定した桁を図-2に色つけて示す。図-3に一番桁と二番桁に関する鞍木・助木除去によるひずみの変化を示す。この図より助木が軸力を一部負担しており、軸方向力の流れを誘導させていたと考えられる。また、鞍木については、除去後のひずみの分布に大きな変化が見られないので、鞍木は自重に対する抵抗力を増すために取り付けられたのではなく、外力による曲げやせん断に抵抗する部材として取り付けられたものと考えられる。すなわち、鞍木はせん断に抵抗する補剛材としての役割を持ち、筋違や振留と同じような意味合いで取り付けられたものと考えられる。また、図-4から実験中や解体中ではひずみの値が大きく出ているものの、時間が経つにつれ回復している。このことから、複雑な木組構造が局所的な応力を徐々に分散させていることが分かる。

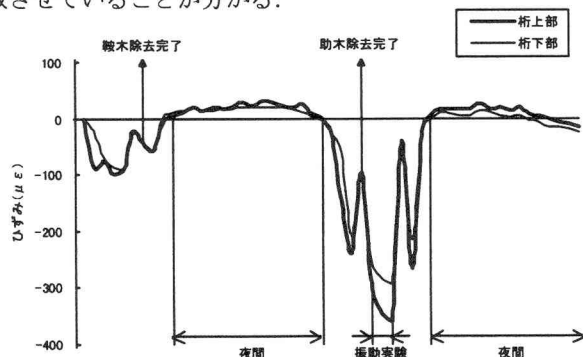


図-4 十番桁端部のひずみの時刻歴応答

4. 使用材料の選択

1953年に再建された錦帯橋の用材の調達には表-2のようである¹⁾。その基準強度は表-3のように与えられている⁴⁾。解体後の部材から試験体を作成し、強度試験を行った結果を表-4~8に示す。

木材圧縮強度は、ケヤキで60.7N/mm²、マツで48.8N/mm²、ヤング係数はケヤキで14100N/mm²、マツで10000N/mm²と50年前から使用されていた材料でも木質構造設計基準を十分満足する値であった。ケヤキの方がマツよりも圧縮強度・引張強度とも大きいですが、比重がケヤキ0.75、マツ0.54であるので、ケヤキの方が重い。このため当初鞍木に利用されていたケヤキはマツに変えられ、今日に至っている。

表-1 錦帯橋上部構造の改良点

年号	主な改良点
1673年	創建 (図面がない)
1678年	鞍木・助木の取付
1707年	段板の接合方法の変更
1796年	高欄の仕様変更：枕木の取付

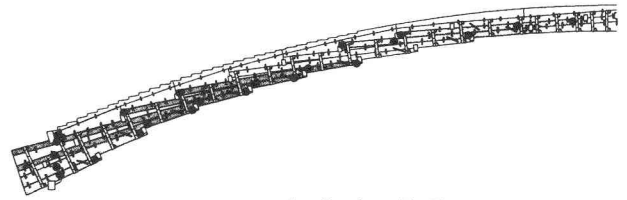


図-2 ひずみ測定の箇所

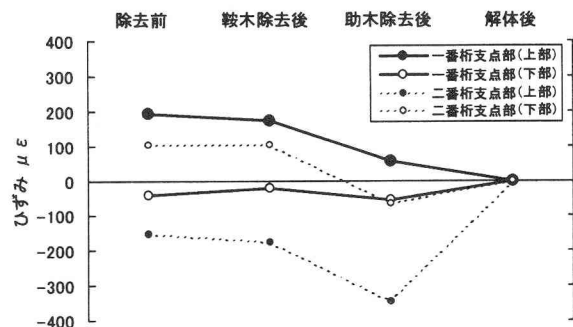


図-3 鞍木と助木除去前後のひずみ

表-2 基準強度値(N/mm²)⁴⁾

樹種	圧縮強度	曲げ強度	せん断強度	ヤング係数
ケヤキ	43.0	85.0	11.0	8000
マツ	40.0	70.0	8.0	8000
ヒノキ	42.5	75.0	8.0	9000

表-3 木材の種類・使用箇所・調達先¹⁾

樹種	使用箇所	調達先
ヒノキ	敷板、高欄など	長野(木曾)
マツ	桁など	鹿児島、宮崎(霧島)
ケヤキ	桁など	群馬、埼玉(秩父)
クリ	梁・桁の雨覆	島根、広島
カシ	太柄	島根、広島

表-4 木材の材料特性(圧縮強度)

試験片	圧縮強度(N/mm ²)	ヤング係数(N/mm ²)	含水率(%)
ケヤキ	60.7	1.41E+04	6.5
マツ	48.8	1.01E+04	8.1
ヒノキ	33.5	8.98E+03	12.9

表-5 木材の材料特性(引張強度)

試験片	引張強度(N/mm ²)	ヤング係数(N/mm ²)	含水率(%)
ケヤキ	90.1	1.04E+04	9.8
マツ	42.2	5.08E+03	7.4
ヒノキ	65.4	7.80E+03	11.7

表-6 木材の材料特性(せん断強度)

試験片	せん断強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)	含水率 (%)
ケヤキ	11.9	5.68E+03	6.9
マツ	11.5	7.37E+03	9.8
ヒノキ	8.0	2.73E+03	9.3

表-7 木材の材料特性(曲げ強度)

試験片	曲げ強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)	含水率 (%)
ケヤキ	74.8	1.23E+04	8.7
松	91.0	1.27E+04	10.1
ヒノキ	56.0	1.10E+04	8.0

表-8 鋼材の材料特性(引張強度)

試験片	降伏応力 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)
鋳(小)	273.7	421.1	1.71E+05
鋳(大)	266.5	339.1	1.81E+05
角鋳	308.5	396.4	2.06E+05
帯鉄	248.8	318.6	1.44E+05
巻金	267.9	404.7	2.00E+05
釘	327.3	456.3	2.01E+05

5. 構造力学的検討

第二橋を図-5のようにモデル化した。桁などの木部および巻金は、はり要素、部材の接合に利用されている釘はジョイント要素を用いてバネに置き換えた。このように力を伝えている箇所はすべてはり要素あるいは非線形のパネ要素でモデル化した。モデルの節点数は鞍木・助木ありが20803個、なしが14778個、要素数は鞍木・助木ありが16579個、なしが11139個である。今回の現地計測により、端部での腐食や桁間の隙間などが多く見られたため予備解析として、境界条件およびヤング率を変化させた4モデルを用いて予備解析をおこなった。

固有値解析を行い、表-9の測定結果と比較した結果、ヤング率を低下させ腐食の見られた岩国側のバネ拘束を減らし、2001年度の実験で得られた値に最も近いmodel-4を本解析で用いることにした。このようなモデル化でも実測値に一致しないのは、隙間と摩擦がモデル化できないことによる。解析コードには汎用有限要素法コード ABAQUSを用いた。解析は第1ステップで自重解析を行い、その後橋面上部に等分布荷重30tf、60tf(群集荷重相当)を載荷した。

表-9 固有振動数¹⁾

	対称モード (Hz)	非対称モード (Hz)
常時振動レベル(数 μm)	3.5	4.9~5.2
人力加振レベル(数mm)	3.0~3.3	4.7~5.0
model-1	4.672	6.437
model-2	4.661	6.421
model-3	4.022	5.517
model-4	4.015	5.505

鞍木・助木のあるモデルと鞍木・助木のないモデルに30tfを載荷したときの变形図を図-6に示す。鞍木・助木を除去することにより、実験では1.6倍変位量が増加した。解析では1.89倍の増加となった。このことより、鞍木・助木が適切にモデル化できていることが分かる。また、鞍木・助木はたわみを減少させる補剛材として橋の上部構造の重量の約12%の重量で、効率よく剛性と耐力を向上させていることも分かった。図-7の応力図を見ると中央の大棟木に大きな圧縮応力がみられ、大棟木がアーチ構造のキーストーンの役割をしていることが分かり、大棟木を少し長めに製作しておくべきことがアーチ形状の保持のために必要であることが確かめられた⁶⁾。図-8に60tf等分布荷重載荷時の実験値と解析値の比較の図を示す。この図より、鼻梁や後梁が各桁の不ぞろいの軸力の一部を負担していることが分かる。

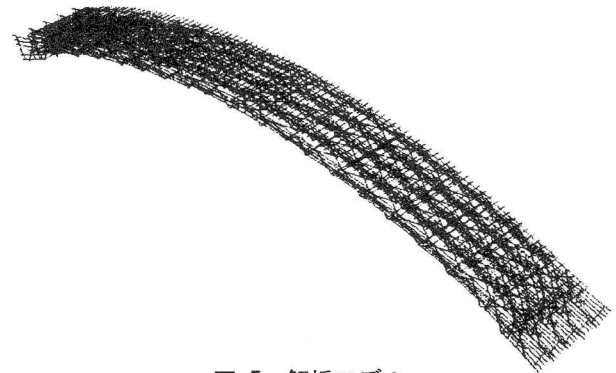


図-5 解析モデル

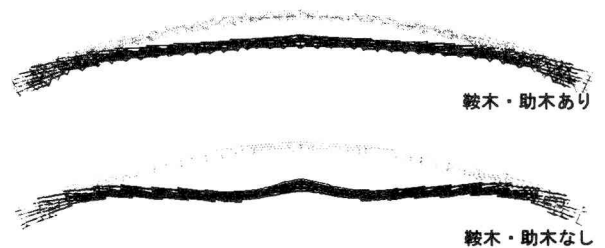


図-6 30tf載荷時の変形図(倍率100倍)

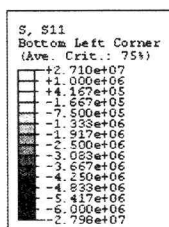


図-7 アーチリブの応力図

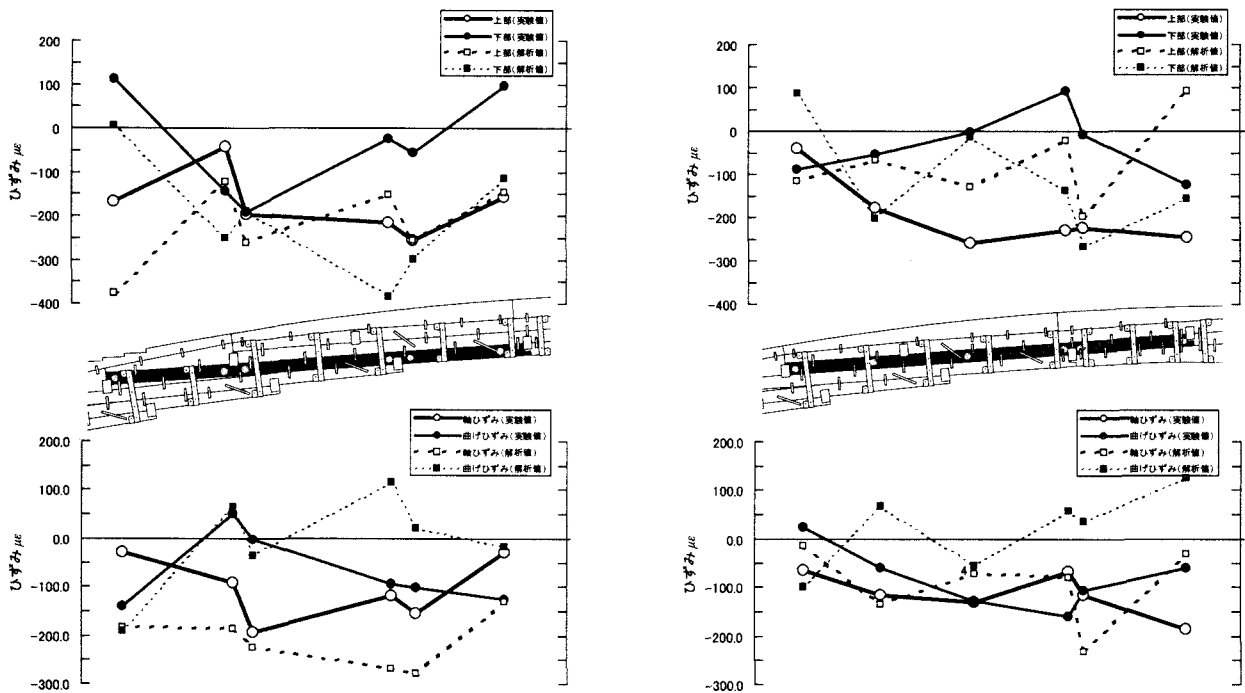


図-8 60tf 載荷時の九番桁と十番桁のひずみ

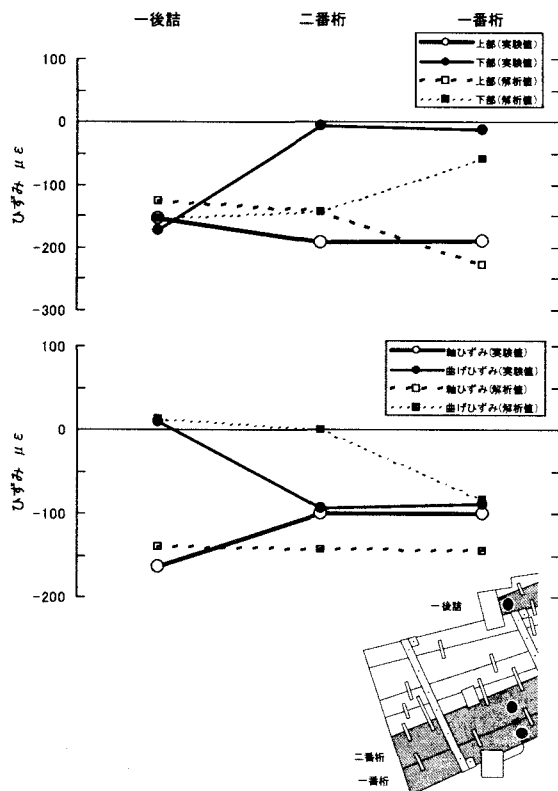


図-9 60tf 載荷時の端部のひずみ

また、図-9 より支点部では、圧縮力が一樣になるように木が組まれていることも分かった。

6. 結論

1) 創建から 5 年が経過して初めて取り付けられた鞍木・助木は単なる飾りではなく、変位やゆれ、桁にかかる応力を低減する構造上重要な部材であり、筋違や振留の意味合いで取り付けられていたであろうことが、現

地での実橋計測および解析によって示された。

- 2) 鞍木の材料や形状の時代順の変化から錦帯橋の上部構造は常に進化していることが分かった。
- 3) 鞍木・助木は上部構造の重量の約 12%の重量で、効率よく錦帯橋の剛性と耐力の向上をさせていることが分かった。

7. 謝辞

強度実験のデータに関しては、東京大学の坂本功教授、腰原幹雄助手を始め坂本研究室の方々にお世話になりました。心からの感謝を申し上げます。また、錦帯橋関連の資料につきましては、錦帯橋建設事務所の方々および岩国伝統建築共同組合の方々にお世話になりました。記して感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 腰原幹雄：錦帯橋の構造特性，第五回木の建築フォーラム 岩国，pp. 31~54，2004 年 1 月
- 2) 東京大学大学院坂本功研究室：錦帯橋強度実験報告書，2003 年 3 月
- 3) 中村雅一：錦帯橋構造図，岩国伝統建築共同組合，2000 年
- 4) 田中宏明：岩国錦帯橋のアーチリブの補強方法の歴史的変遷に関する力学的考察，土木学会第 57 回年次学術講演会，2002 年 9 月
- 5) 日本建築学会：木質構造設計基準・同解説，P. 160，1995 年 1 月
- 6) 依田照彦：錦帯橋，橋梁と基礎，2003 年 8 月