

## 錦帯橋の構造特性に関する解析的研究

### Analytical considerations on the structural characteristics of Kintai-kyo Bridge

早稲田大学 学生会員 久保田成是  
早稲田大学大学院 坂本 雄吾  
早稲田大学 フェロー 依田 照彦

By Seiji KUBOTA  
Yugo SAKAMOTO  
Teruhiko YODA

錦帯橋は、世界でも珍しい木造のアーチ橋であり、日本の 3 名橋のひとつに数えられている。本研究は、歴史的構造物である錦帯橋の維持・管理に役立てるため、錦帯橋の解析モデルを作成し、FEM 解析を行うことにより錦帯橋の構造特性を明らかにすることを目的としている。

錦帯橋を構成する部材の中から、本研究では大棟木と後詰に注目して解析を行った。大棟木と後詰のそれぞれを取り除いた場合の挙動の変化を比較・検討し、これらの部材の働きについて考察した。

今回の解析により、大棟木と後詰は、錦帯橋のアーチ橋としての構造特性において重要な役割を果たしていることが明らかになった。

#### 1. はじめに

本研究では、歴史的構造物である錦帯橋の維持・管理に役立てるため、錦帯橋の解析モデルを作成し、FEM 解析を行った。ここで大棟木と後詰の働きについて考察するため、それぞれの部材の有無による解析結果の差異を考察した。

#### 2. 解析モデル

本研究では、解析を行うにあたり汎用有限要素法プログラム DIANA を使用し、錦帯橋の 1 つのアーチリブについて 2 次元モデルを作成した。錦帯橋を図-1 に、解析に用いたモデルを図-2 に示す。桁や梁部分には 4 節点 shell 要素を用い、巻金には 2 節点 beam 要素を用いた。要素数は約 60000 である。また、界面要素の構成則は予備解析を行うことにより表-1 のように定めた。



図-1 錦帯橋



図-2 錦帯橋の解析モデル

#### 3. 予備解析

界面要素の材料構成則については、2 種類の予備解析を行うことにより、接線方向と法線方向の 2 つの変位方向に関する剛性を決定した。

##### a) 接線方向の剛性

2002 年に行われた錦帯橋の桁を単純化したモデル(図-3)に置き換えた試験体に対する静的載荷部分実験のデータ<sup>1)</sup>をもとに、桁と桁の相対変位が完全に一致するまでせん断方向に対する剛性を調整し、接線方向の剛性を決定した。

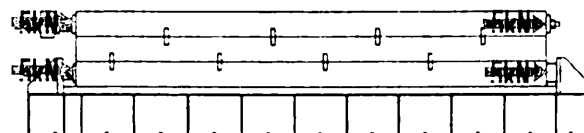


図-3 試験体のモデル化 (接線方向の剛性)

##### b) 法線方向の剛性

橋脚から約 5m の部分のみを残した片持ち梁状態のアーチリブを試験体(図-4)として、橋桁端部にモーメントを発生させるような載荷実験が 2002 年に行われた<sup>1)</sup>。この実験における荷重と桁端部の回転角のデータをもとに、接線方向の剛性を変えずに法線方向の剛性を調整した。

keyword : 木造橋 アーチ構造 大棟木 後詰

連絡先 : 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 51 号館 依田研究室 TEL. 03-5286-3399

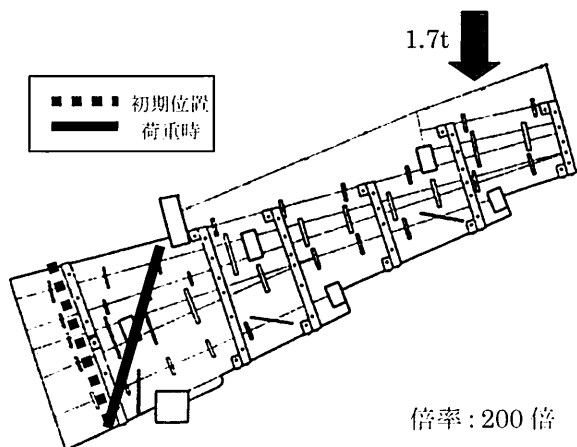


図-4 試験体のモデル化（法線方向の剛性）

以上の2つの予備解析から得られた界面要素の剛性を表-1に示す。

表-1 界面要素の剛性

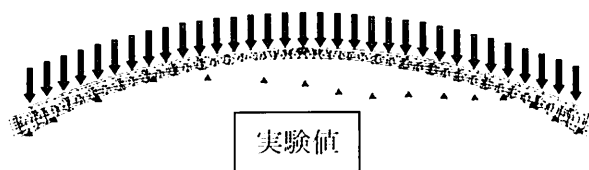
|      |                          |
|------|--------------------------|
| 接線方向 | 50.2(N/mm <sup>2</sup> ) |
| 法線方向 | 720(N/mm <sup>2</sup> )  |

ここで、2003年に行なわれた分布荷重実験の結果と、表-1のように求めた剛性を使用したモデルに同じように載荷して解析を行った結果とを比較する。各載荷状態におけるそれぞれの変形の様子を比較したものを図-5～8に、最大変位を比較したものを表-2に示す。なお、変形は50倍に拡大して表示している。

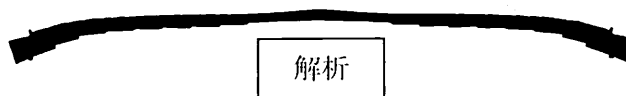
表-2 最大変位の比較

|     | 実験値(cm) | 解析値(cm) |
|-----|---------|---------|
| 図-5 | -2.62   | -3.93   |
| 図-6 | -8.57   | -8.37   |
| 図-7 | -5.36   | -7.86   |
| 図-8 | -7.97   | -10.9   |

今回の解析モデルでは左右の対称性を仮定しているのに対し、変形図の違いから実際の錦帯橋は左右非対称になっていることがわかる。しかしながら、最大変位を見るとほぼ同程度の値となっており、界面要素の値としては妥当であるといえる。実験値の方が小さな値となっている理由としては、モデル化することが困難であった鍔や、鞍木、助木などの影響で実際の錦帯橋よりも解析モデルの方が剛性の高い構造になっていることが推測できる。

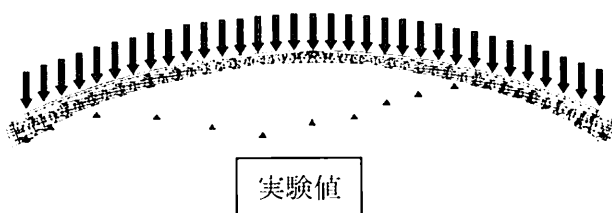


実験値

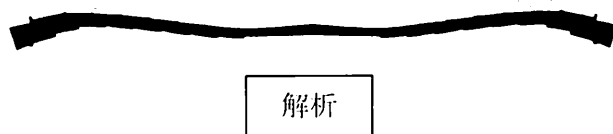


解析

図-5 等分布荷重（合計30tf）時の変形

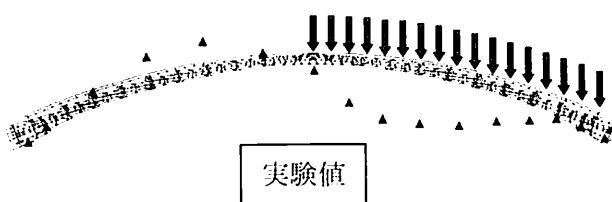


実験値

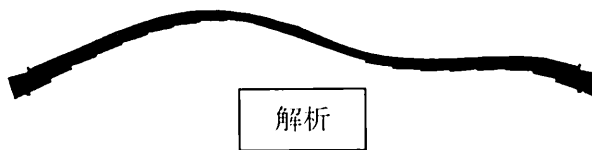


解析

図-6 等分布荷重（合計60tf）時の変形

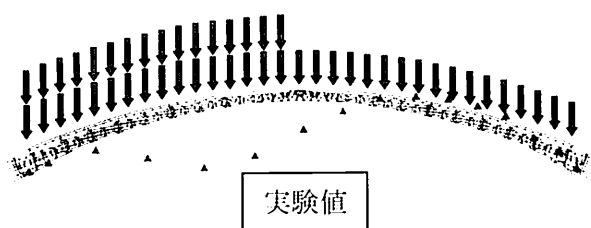


実験値



解析

図-7 偏載分布荷重（合計15tf）時の変形



実験値



解析

図-8 偏載分布荷重（合計45tf）時の変形

#### 4. 解析方法

各部材の重要性を明らかにするために、部材を取り除いたモデルを作成し、解析を行った。本研究ではアーチ橋中央部に存在する大棟木（図-9）と、アーチリブ上部の桁尻に配置される後詰（図-11）に着目した<sup>2)</sup>。

大棟木を取り除いたモデルと後詰を取り除いたモデルをそれぞれ図-10、図-12に示す。



図-9 大棟木の位置



図-10 解析モデル（大棟木なし）

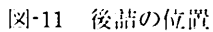


図-11 後詰の位置

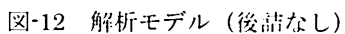


図-12 解析モデル（後詰なし）

また、载荷にあたっては60 t fの等分布荷重（図-13）として载荷させた。

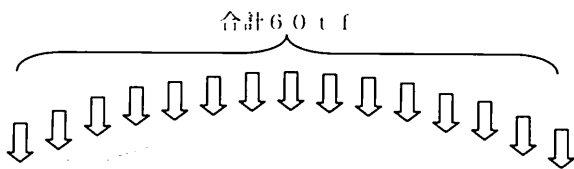


図-13 载荷方法

#### 5. 解析結果

##### a) 大棟木の影響

大棟木の働きを考察するために、大棟木を含むモデルと大棟木を取り除いたモデルとの比較を行う。等分布荷重を作用させたときの結果を以下の図に示す。

なお、変形図（図-14、15）では変形を30倍に拡大して表示している。また、応力図において、青色は圧縮、赤色は引張を示し、応力の方向は軸方向である。

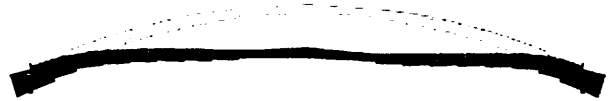


図-14 変形図（大棟木あり）



図-15 変形図（大棟木なし）



図-16 中央部の応力図（大棟木あり）



図-17 中央部の応力図（大棟木なし）



図-18 応力図（大棟木あり）



図-19 応力図（大棟木なし）

また、大棟木の長さが変形時の形状に与える影響について示したものが図-20 である。大棟木を少し大きめに製作するところに匠の技がある。

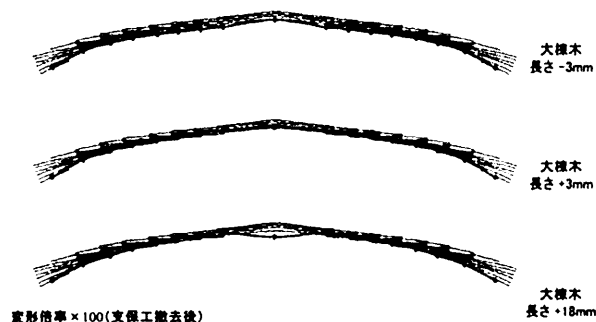


図-20 大棟木の長さとアーチ形状

#### b) 後詰の影響

後詰の働きを考察するために、後詰を含むモデルと後詰を取り除いたモデルとの比較を行う。a) と同様に等分布荷重をかけたときの結果を以下の図に示す。

なお、変形図(図-21, 22)では変形を約 27 倍に拡大して表示している。

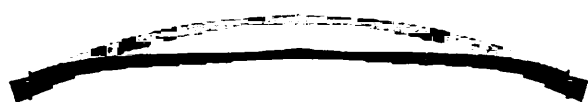


図-21 変形図(後詰あり)

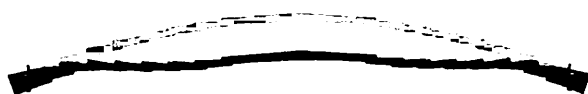


図-22 変形図(後詰なし)



図-23 中央部の応力図(後詰あり)



図-24 中央部の応力図(後詰なし)

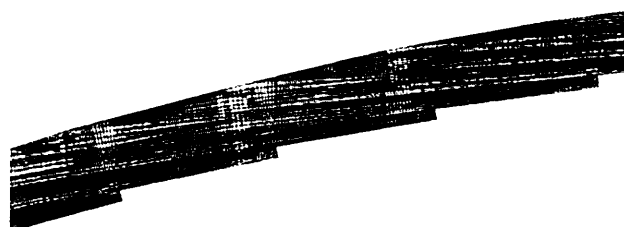


図-25 応力図(後詰あり)

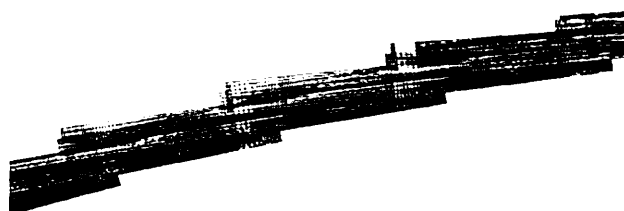


図-26 応力図(後詰なし)

#### 6. 考察およびまとめ

まず、大棟木に関する解析結果を比較すると、大棟木があることで錦帯橋のアーチ構造としての特性が明確になったといえる。大棟木がない場合には荷重がかかった際に中央部がとがってしまい、中央部の上部に大きな引張応力が生じる。このことから、大棟木はアーチ曲線を描く上で重要な役割を果たしていることがわかる。各桁の下部に発生する引張応力も大棟木を入れることにより圧縮応力に変化させることができ、錦帯橋に加わった力を均等に圧縮応力として伝えることができているといえる。

さらに、後詰に関する解析結果を比較すると、基本構造完成後に付け足されている後詰ではあるが、今回の研究においてその重要性を知ることができた。図-24 より、後詰がないモデルでは中央部の下端に大きな引張応力が働いていることが分かる。図-23 では引張応力が見られないことから、後詰を加えることでより理想的なアーチ構造に近づいていると考えられる。

以上のことより、大棟木と後詰は錦帯橋がアーチ構造を保持する上で非常に重要な役割を果たしており、これらの部材の存在こそ、錦帯橋が構造力学的にもアーチ橋であることを示している証左ともいえる<sup>3)</sup>。

#### 参考文献

- 1) 東京大学大学院坂本功研究室: 錦帯橋強度実験報告書, 2002 年
- 2) 岩国市: 名勝錦帯橋架替事業報告書, 2005 年
- 3) 早稲田大学理工総合研究センター: 錦帯橋強度試験報告書, 2004 年