

中国古来の木組技術「虹橋」の構造特性

北海道大学 正会員 ○佐々木貴信, 澤田圭, 佐々木義久
東京コンピュータサービス(株) 池田 奈穂

1. 目的

中国の北宋時代(A.D.960-1127)に実在した「虹橋」は、釘や金物を用いず短い角材を組み合わせて長いスパンを実現しており、木材同士の摩擦力だけで架橋された合理的な木橋であった。古典に描かれた虹橋は、橋の上を多くの人々や荷物を運ぶ馬が行き交い、上方からの荷重に対して十分な耐荷力を有していたと考えられる。中国では丸太を用いた類似の構造を有する木橋がいくつか現存していることが報告されている。本研究では虹橋(図1)の構造特性を明らかにすることを目的として、小試験体や実大試験体を対象に載荷試験を行い、その耐荷力や変形挙動の評価を試みた。

2. 試験方法

(1) 小試験体

9×9×220mmの主材10本と9×9×100mmの横材5本(何れもスギ材)を用いて小試験体を作成した。載荷試験では中央の横材に集中荷重をかけ、この横材の端部で鉛直変位を測定した(図2)。水平変位の拘束の有無および主材と横材の接合部の接着の有無の条件の組み合わせで表1に示すように3ケースで試験を行った。Case1は虹橋の支点をフリーにし、部材同士は接合せず主材に設けた切り欠きと溝に横材を嵌め込むだけで組み上げた。Case2は虹橋の支点の水平移動を拘束し、部材同士は接合せずに実験を行なった。Case3は虹橋の支点をCase2と同様に固定し、部材同士の接点をエポキシ樹脂系接着剤によって接着した。

(2) 実大試験体

90×90×2000mmの主材10本と90×90×1000mmの横材5本(何れもトドマツ材)を用いて小試験体の10倍の大きさにあたるスパン約5mの実大試験体を作成した。載荷試験は小試験体実験と同様に中央の横材に集中荷重をかけ、各横材の鉛直変位と支点の水平変位を測定した。小試験体と同様に、水平変位の拘束の有無と部材同士の結合の有無によって3ケースについて試験を行った(表1)。Case1およびCase2では主材に設けた深さ30mmの溝部に横材を嵌め込むことで組み上げた。Case3ではこの嵌合部分をビス(シネジック社製パネリードII+: φ6mm, L160mm)で固定して接合した。また、Case2およびCase3では鋼製のターンバックル(φ16mm)をタイ材として用いて水平変位の拘束を行なった(図3)。主材やタイ材にはそれぞれひずみゲージを取り付け、条件の違いと主材の応力分布の関係や、鉛直荷重に対するタイ材の引張力の変化を考察した。

小試験体および実大試験体の実験結果は、立体フレーム解析(CADTOOL フレーム構造解析 11)の結果と比較して評価した。解析条件は、支点の水平変位を拘束した場合はピン支持、拘束していない場合は虹橋の桁方向にのみ移動自由とした。また、部材同士の結合を行う場合は接合部を剛接合とし、結合を行わない場合はピン接合と設定して解析した。

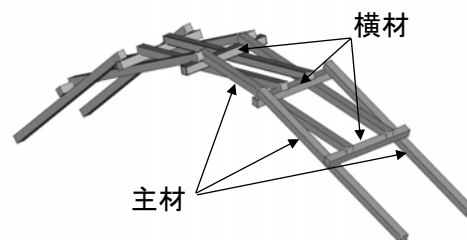


図1 虹橋構造



図2 小試験体(Case1)

表1 試験条件

Case	水平変位	部材同士の接合
Case1	自由	嵌合のみ
Case2	拘束	嵌合のみ
Case3	拘束	嵌合+接着/ビス

キーワード 木橋, 載荷試験, 虹橋

連絡先 〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目 北海道大学大学院・農学研究院 tak-sas@for.agr.hokudai.ac.jp

3. 試験結果

試験結果を表 2 に示す。小試験体および実大試験体ともに水平変位を拘束しない Case1 では、鉛直荷重が増加するにつれて支点が水平方向に滑るように変位し、鉛直変位が大きくなった。Case2 では水平変位を拘束したことにより最大荷重が増加し、鉛直変位も抑えられた。しかし、荷重を増加させていくと部材同士が外れる変形が見られた(図 4)。これは支点の水平変位を拘束しても上段の主材の水平変位が抑えられないためと考えられる。Case3 では部材同士を固定することで主材と横材が外れるような変形を防ぎ、耐荷重の向上と鉛直変位が減少することが確認された。なお、Case3 において小試験体と実大試験体いずれも最終的に中央主材の引張側で破壊が生じ、実大試験体では、最大荷重 19.6kN の時に中央主材の引張側の節から破壊した。この時、ひずみゲージの値から求めたタイ材に作用する引張力は 9.85kN であった。

4. 考察

小試験体および実大試験体の載荷試験における荷重と鉛直変位の関係を解析結果と比較して、図 5、図 6 にそれぞれ示す。小試験体では、Case3 の結果が接合部をピン接合として解析した結果と接合部を剛接合として解析した結果の中間に位置している。したがって、部材同士の接着を行なったことによって接合部の回転剛性が向上したが、完全な剛接合にはならず半剛接合となっていることが示唆された。また、実大試験体では Case3 の試験結果が、水平変位を拘束し接合部をピン接合として解析した結果と近い値となったことから、接合部をビスで固定した場合はピン接合として解析する方が適当であると言える。各小試験体の主材の中央下側に貼付したひずみゲージ(図 2)の測定では、Case1 では全ての主材に引張ひずみが発生しており、下段、中段、上段の順にひずみが大きくなっていた。一方、支点の水平移動を拘束し、主材と横材を接合した Case3 では上段の主材にのみ引張ひずみが発生し、中段および下段の主材には圧縮ひずみが発生していた。なお、解析結果でもこれらと同様の挙動が確認できた。また、本研究では、実大試験体と同じ寸法で主材を 3 列にした虹橋構造を屋根に用いた小規模な四阿を建設し、積雪荷重に対する変形挙動を計測したが、積雪 80cm の時点で中央の鉛直変位は 7.5mm であった。



図 3 小試験体 (Case2)



図 4 横材の転倒 (Case2 破壊時)

表 2 試験結果

Case		耐荷重 (N)	鉛直変位 (mm)
小試験	Case1	28	10.0
	Case2	89	4.8
	Case3	391	11.0
実大試験	Case1	3,800	77.8
	Case2	5,110	15.6
	Case3	19,600	41.8

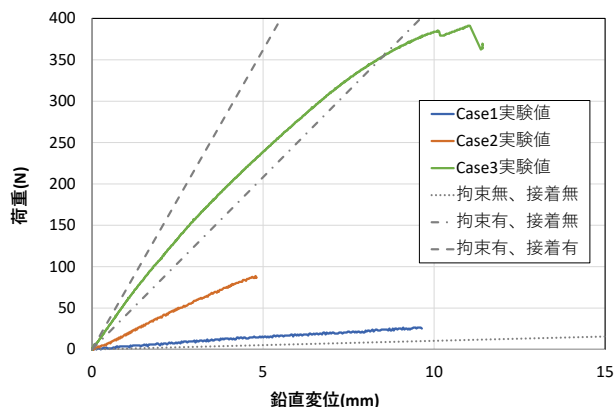


図 5 荷重と中央変位の関係 (小試験体)

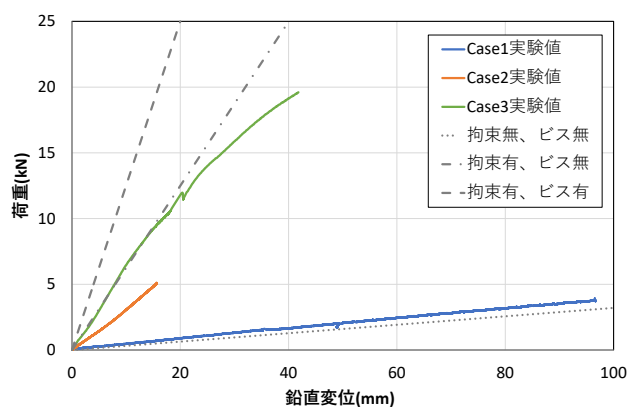


図 6 荷重と中央変位の関係 (実大試験体)

参考文献

1) 渡辺浩, 小林一郎, 佐々木康寿: 中国の木アーチ橋との比較による錦帯橋の唯一性の検証, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 2011.