

小規模木桁橋の荷重分配に関する研究

A study for load distribution of short spanned timber girder bridges

上月裕* 渡辺浩** 山尾敏孝***

Kouzuki Yutaka, Watanabe Hiroshi and Yamao Toshitaka

*工修 熊本県庁参事 環境生活部 (〒862-8570 熊本市水前寺 6-18-1)

**博 (工) 福岡大学助教授 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1)

***工博 熊本大学教授 大学院 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

Recently, a large number of the timber bridges are constructed. The most of timber bridges are pedestrian bridges with short spanned length and mainly used a simple girder type. In these bridges, it is necessary to know its behavior for load distribution to increase the durability. However, the behavior of these bridges is not clearly clarified yet. The loading tests were performed to investigate the behavior of short spanned timber bridges. And the numerical analyses were carried out by changing material properties and boundary conditions of connection parts. The details of behavior were investigated, compared with results of lading test and numerical analysis. As a result, the tendency to the behavior of the timber bridge was able to be confirmed by combining some analysis conditions.

Key Words: load distribution, loading test, structural analysis, timber pedestrian bridge

キーワード: 荷重分配, 載荷試験, 構造解析, 木歩道橋

1. はじめに

高度経済成長期を境に、交通荷重の増加による部材の大断面化や河川管理のための支間の長大化等の橋梁に対する要求水準の変化と鋼材やコンクリートの安価で安定した多量の材料供給等の理由により、次第に数を減らしていった木橋であったが、近年、その架設実績が急速に増加している。その背景には、木材加工技術や防腐処理技術の進歩、アメニティ志向の高まり、地球温暖化対策としての木材利用の重要性などの理由が挙げられる。このようにして架けられた木橋は現在1,000橋を越すともいわれている。

このような木橋の中で、着実に数を増やしているのが写真-1に示すような木桁橋である。例えば熊本県においては、県内の木橋の約80%強が木桁橋であることが判っ

ている¹⁾。これらの木橋において重要になるのが、写真-2に示すような耐久性に大きな影響を与える腐朽への対策である。このような腐朽対策においては、従来の薬剤処理と併せて、腐朽の要因となる水分の滞留しやすい接合部や切り欠き部分をできるだけなくす等、弱点を少なくするような構造形式の検討も重要であり、このためには、橋の挙動から部材の要不要を見極めることが必要となってくる。例えば、小規模な木橋にも、横方向の荷重分配のために横桁が設けられている場合があるが、桁高が小さいことや床版支点の間隔が狭いことから、床版による荷重分配でも十分であり、横桁は不要な場合もあると考えられる。しかし、単純桁橋という簡易な構造であるため実際に検証されることは少なく、その挙動が明らかではないというのが現状である。



写真-1 木桁橋の事例



写真-2 木橋に見られる腐朽の例

以上のことから、本研究では実橋をモデルに载荷試験及び構造解析を行うことで、小規模木桁橋の基本的な挙動を確認するとともに、解析条件に対する考え方を整理した。さらに、これらの結果をもとに、将来の木桁橋の合理的な形状の検討を目的に、構造解析を行い、床版等の部材が橋全体の挙動に与える影響を検討した。

2. 対象橋

本研究の対象とした橋（以下、対象橋）は、熊本県阿蘇市に平成17年3月に竣工した木歩道である（写真3、図-1）。構造形式は、支間1.2m、有効幅員1.0mの小規模木桁橋で、実橋のまま実験室へ搬入可能な大きさであることから、正確な実験結果が期待できること、木桁橋の基本的考え方の整理は当該規模の橋で可能であると判断されたことから、当該橋を今回の研究対象橋と決定した。使用材は地元産のスギ材を用いており床版と主桁の間に遮水シートを設けるなど、耐久性の向上が図られている。また、設計条件は主桁がスギの機械等級区分²⁾におけるE-70（5,900～7,900N/mm²）、床版がE-50（3,900～5,900N/mm²）となっており、桁と床版は写真4に示すように木ネジ2本で、また地覆と床版はボルトで接合されている。

3. 载荷試験による挙動の検討

3.1 桁材の性能確認

载荷試験にあたり、桁材の性能確認のため、主桁毎に曲げ試験を行った。支間を対象橋と同様の1,200mmとした各主桁に0.98kNを载荷後、たわみを測定し構造用木材の試験強度法³⁾にもとづき各主桁のヤング係数を求めた。表-1はヤング係数の測定結果であるが、平均で7,177N/mm²を示しており、3主桁とも設計強度E70の許容値5,900N/mm²を上回っていることがわかる。

3.2 载荷試験の概要

写真-5に示すように、対象橋を現場より実験室へ搬入して载荷試験を行った。载荷方法は図-2に示すように単純支持で支間中央への1点载荷、支間は設計に従い1,200mmとした。支承である枕木を取り外し、めり込み防止のための鋼板を介しアンクル上に設置した。始めに接合部の遊びや支点の座りが安定するよう1.08kNを载荷し、続けて短期許容応力⁴⁾から算出した最大荷重5.88kNまで载荷した。変位計は図-3に示すように、それぞれの桁の中央にたわみの平均をとるために2本ずつ、また、めり込みや浮き上がりの影響を考慮するため支点上にも設置した。ひずみについては各桁の中央下縁、また床版による応力伝達の様子を把握するために中央（床版A）と1/4点の床版（床版B）上縁にひずみゲージを貼った。



写真3 対象木橋

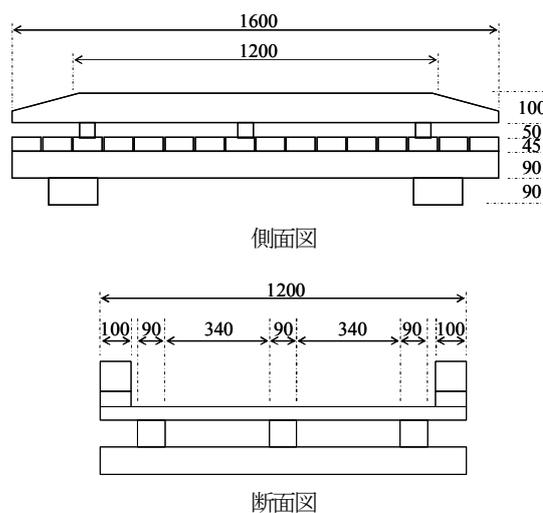


図-1 対象橋の寸法 単位：mm



写真4 床版取り付け状況

表-1 ヤング係数測定結果

	曲げヤング係数	E70の許容値 ²⁾
桁1	8,100 N/mm ²	5,900 N/mm ²
桁2	5,960 N/mm ²	
桁3	7,470 N/mm ²	
平均	7,177 N/mm ²	

3.3 載荷試験の結果と検討

載荷試験は、ケース1（地覆あり）、ケース2（地覆無し）のそれぞれのケースについて2回の載荷を行った。載荷1回目と2回目ともほぼ同じ経路をたどったことから良好な測定が行えたと考えられる。めり込みに関しては鋼板を桁と支点の間にはさんだ結果、大きな影響は見られなかった。また、荷重との関係が直線を描いていることから弾性範囲内での挙動であったことがわかる。このことから、以後の考察はより安定していた載荷2回目の結果をもとに行う。図4、図5はケース1、2の荷重に対する桁のたわみ・ひずみと床版ひずみの関係を示したものである。実線はケース1（地覆あり）の挙動を、破線はケース2（地覆無し）の結果を示している。

ケース1（地覆無し）では、たわみ、ひずみともに直接載荷した桁2において大きな値が測定され、両脇の桁1、3にも値が出ており、床版による荷重分配が行われたことがわかる。図中に示す一点鎖線は荷重分配におけるたわみとひずみの理想値である。荷重分配0%は桁2に全ての荷重がかかったと仮定した場合、つまり桁2のたわみが、荷重分配0%の直線に一致するとすれば、他の桁のたわみは0になる。一方で荷重分配100%は3本の桁に均等に荷重が分配されたと仮定した場合であり、例えば3本の桁のヤング係数が同じであった時、3本のたわみが荷重分配100%の直線上に全て重なることになる。ただし、対象橋のそれぞれの桁のヤング係数が違うため、桁2のヤング係数をもとに算出している。実験値は荷重分配100%の方に近く、床版による荷重分配の効果が大きいといえる。たわみから荷重を逆算すると与えた荷重の約6割が分配されたことになる。

ケース2の桁の挙動は、地覆の取り付け位置に近い両端の桁だけではなく、中央の桁までたわみとひずみが減少しており、橋全体としての剛性が向上したといえる。ここで、地覆なしの場合に桁1と3のたわみに差がなかったことに対し、地覆ありの場合で差が見られた。またひずみについても地覆の有無で桁1、3の大小が入れ替わっている。これらのことから、桁3側の地覆のほうが、桁1側の地覆よりヤング係数が高いと考えられる。

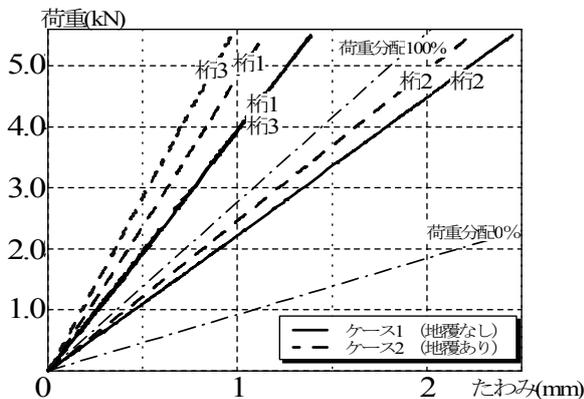


図4 荷重とたわみの関係

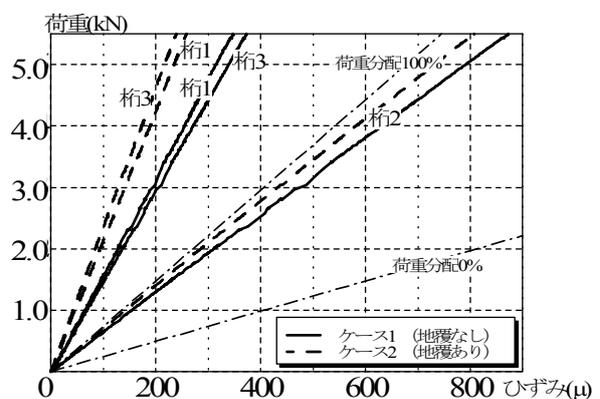


図5 荷重と桁ひずみの関係



写真5 載荷試験の状況

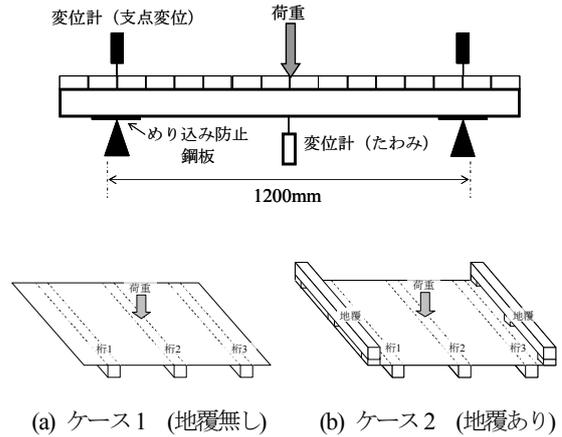


図2 載荷試験の概要

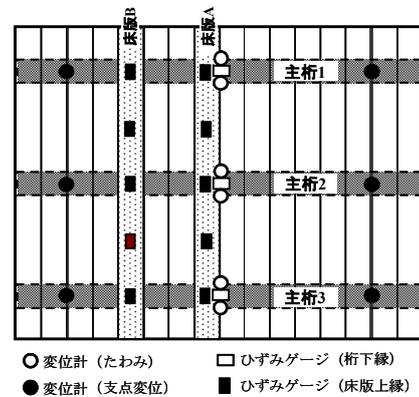


図3 変位計、ひずみゲージ設置箇所

表-2 解析条件の比較

解析条件	材料特性	部 材				接合条件	
		定 数	桁1	桁2	桁3		床版
条件①	等方性	ヤング係数 (N/mm ²)	8,100	5,960	7,470	6,900	要素間節点は剛結
		せん断弾性係数 (N/mm ²)	2,700	1,990	2,490	2,300	
		ポアソン比	0.5				
条件②	異方性	ヤング係数 (N/mm ²)	8,729	6,423	8,050	6,900	条件①と同様
		せん断弾性係数 (N/mm ²)	757	557	698	598	
		ポアソン比	0.5				
条件③	異方性	ヤング係数 (N/mm ²)	8,729	6,423	8,050	6,900	桁と床版間をヒンジとする
		せん断弾性係数 (N/mm ²)	757	557	698	598	
		ポアソン比	0.5				

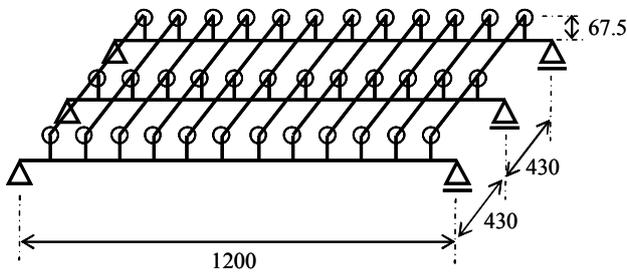


図-6 主桁モデル

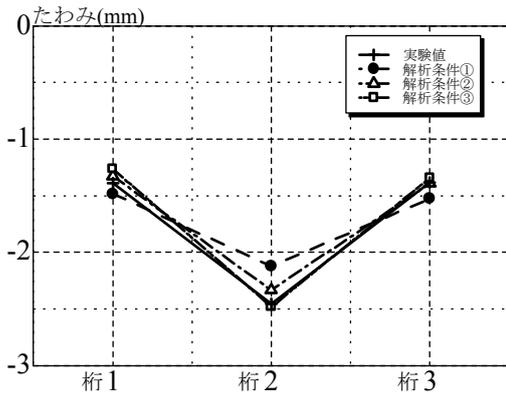


図-7 実験と解析のたわみの比較 (主桁 E-70, 床版 E-70)

4. 構造解析による挙動特性の検討

4.1 解析条件の検討

載荷試験の結果から桁や床版の基本的な挙動が確認された。これをもとに、さらに詳細な木橋の挙動を検討するため、汎用解析プログラム MARC³⁾を用いて構造解析を行った。

解析においては、図-6のように対象橋を梁要素により、231 節点 252 要素を設けてモデル化した。床版については、支点間の 12 本のみを要素化し、高さ方向に桁と床版の中立軸の間隔 67.5mm だけ移動させ、床版の取り付け位置を考慮している。また、各要素間の節点は剛結とした。表-2に示す3条件による解析結果と実験(ケース1)との結果を比較することにより解析条件の検討を行った。

解析条件①

桁のヤング係数は対象橋架設前のヤング係数測定の実測値を用い、部材を等方性材料として扱った。床版の設計ヤング係数は E-50 であったが、床版のヤング係数を測定した結果、実際には E-70 以上の材が用いられていたことから、床版は E-70 (6,900N/mm²)とした。ポアソン比は木材工業ハンドブック⁹⁾から 0.5 とした。また、せん断弾性係数はヤング係数とポアソン比を用い、等方

性材料におけるせん断弾性係数の理論式より算出した。

図-7 の破線は解析条件①における各主桁の中央横断面でのたわみを示している。実験値(実線)に比べ、桁2のたわみは小さく、桁1, 3のたわみが大きくなっている。このことから、実際の挙動は解析結果よりも横方向の荷重分配作用が小さいものと考えられる。

解析条件②

解析条件②では、木材の特徴である異方性を考慮した。木材工業ハンドブック⁹⁾に示されているヤング係数と繊維方向別の弾性係数の比率を参考にし、対象橋の各部材の弾性係数を推定した。この際に、架設前の曲げヤング係数はせん断変形の影響を含んでいることから、せん断変形の影響が重複されないように構造用木材の強度試験法³⁾を参考に曲げヤング係数の補正を行った。表-2より、解析条件②のせん断弾性係数は解析条件①に比べ、4分の1程度になっていることがわかる。

図-7の1点鎖線は解析条件②における各主桁の中央横断面でのたわみを示している。異方性を考慮した場合、解析条件①(等方性)に比べ、せん断変形の影響により全体的にたわみが大きく変化していることがわかる。このことから、木材の解析において異方性を考慮することの重要性が伺える。

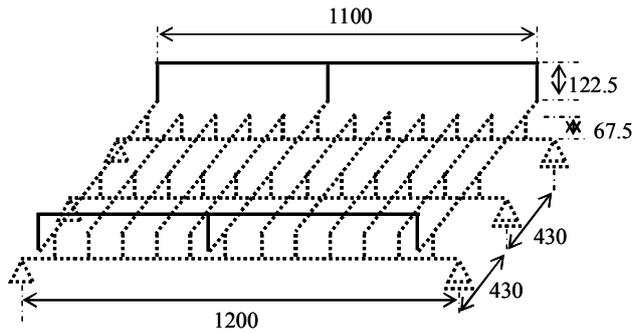


図-8 地覆モデル

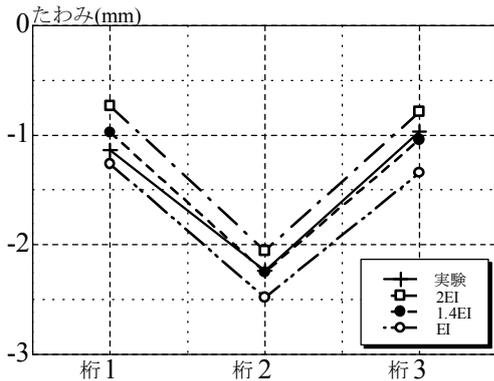


図-10 曲げ剛性の置き換え (主桁E-70, 床版E-70)

解析条件③

解析条件③では、床版と桁が木ネジにより接合されていることを考慮し、解析条件②の異方性の考慮に加え、図-6に○印で示す床版と桁との接合部をヒンジとした。

図-7に解析条件③の結果を二点鎖線で示している。桁2のたわみが増加し、桁1, 3のたわみが減少しており、床版と桁の接合の状態が横方向の荷重分配作用に影響を与えることがわかる。このことから、接合条件をヒンジとすることで、より実験値に近い挙動となるといえる。

以上より解析条件を組み合わせることで、木橋の挙動を把握できることがわかった。解析条件③を考慮した場合において実験結果に近い結果が得られたため、以下この解析条件を用いて検討を行う。

4.2 地覆の影響

ケース2 (地覆あり) の実験結果をもとに、構造解析により、地覆が曲げ部材として橋全体に与える影響について検討した。図-8に解析モデルを示す。

4.2.1 接合条件

対象橋では、地覆と床版はボルトにより接合されているが、これを剛結とした場合とヒンジとした場合の2ケースで解析し、実験結果と比較した。図-9はこれらの結果を示しているが、剛結とした場合は、地覆に完全に荷重が伝わることから実験と比べ、たわみ全体が小さくなっていることがわかる。また、ヒンジとした場合は、た

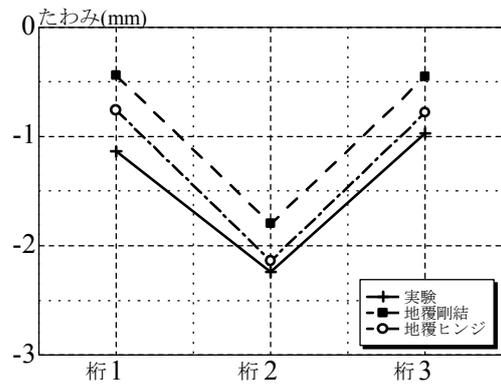


図-9 地覆モデルによる解析 (主桁E-70, 床版E-70, 地覆E-70)

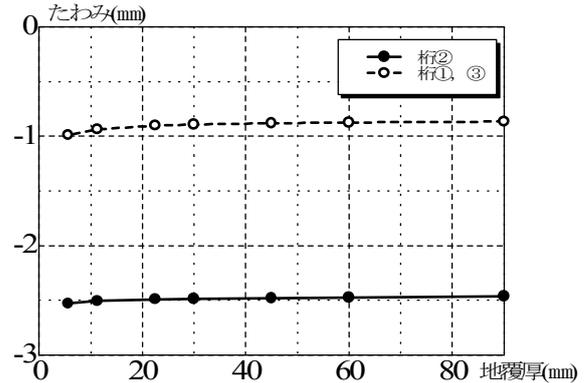


図-11 地覆厚とたわみの関係 (主桁E-70, 床版E-70, 地覆E-70)

わみ全体が大きくなり、より実験値に近い値となることとわかる。このことから、床版と地覆のボルトによる接合も床版と主桁の木ネジによる接合同じように、解析上はヒンジに近い挙動であると考えられる。

4.2.2 曲げ剛性の置き換え

主桁モデル (図-6) により解析を行い、地覆が曲げ部材として与える影響を桁1, 3の桁の曲げ剛性の向上に置き換えることを試みた。図-10に実験と解析の中央断面でのたわみ分布を示す。図中に示す2EIとは、2本の桁が積み上げられたことに相当する剛性の単純和である。この2EIを桁1, 3の剛性として入力すると、3本の桁のたわみが実験値と比べて小さく出ている。また、2EIと地覆がない場合の剛性EIとの間に実験でのたわみが分布しており、桁1, 3の剛性の値を変えていくと1.4EIで解析結果と実験結果が近くなることとわかる。このことから、地覆の曲げ部材としての効果は4割増し程度であり、地覆による橋全体の曲げ性能の向上が可能であることがわかった。

4.2.3 地覆厚

図-11は地覆厚の変化とたわみの関係を示したものである。地覆厚を変化させても桁のたわみは殆ど変化していないことがわかる。このことから、地覆には曲げ部材としての効果はあるものの、必要以上に断面を大きくしても、その分の効果は期待できないといえる。

4.3 床版厚の影響

3.3 で示したように、今回の対象橋のように比較的床版断面が大きい場合は床版の荷重分配効果あることが判った。そこで、主桁モデル (図-6) において、3 主桁の場合に床版厚を変化させることによる荷重分配の影響を構造解析により検討した。図-12 は、床版厚とたわみの関係を示している。また、図中の1点鎖線は、荷重分配 100%の線で床版厚が厚くなればなるほど、各桁のたわみは限りなくこの線に近づくと考えられる。

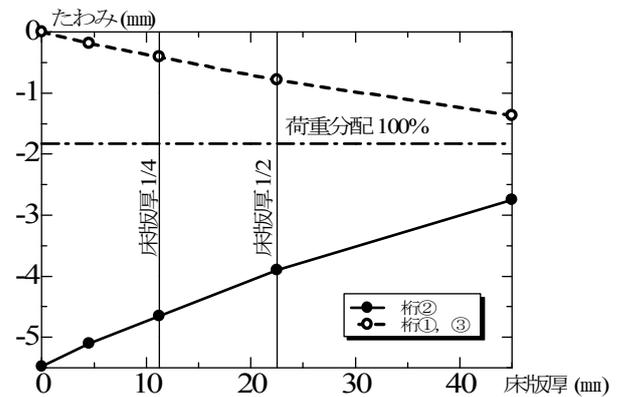


図-12 床版厚とたわみの関係 (主桁 E-70, 床版 E-50)

4.4 主桁本数の影響

床版による荷重分配効果の隣接の桁に対する影響が 3.3 で解明されたことから、主桁モデル (図-6) において、主桁数を増やした場合の桁への荷重分配の影響について検討を行った。図-13, 図-14 は、それぞれ 4 主桁と 5 主桁の場合のたわみ分布を示している。4 主桁の場合も 5 主桁の場合も、載荷点に対応する桁のたわみはほぼ同じであり、隣接した桁以外のたわみは 0.5mm 以下と極めて小さいことがわかる。このことから今回の解析モデルに関しては、荷重分配の影響については、隣接する桁について考慮すればよいといえる。

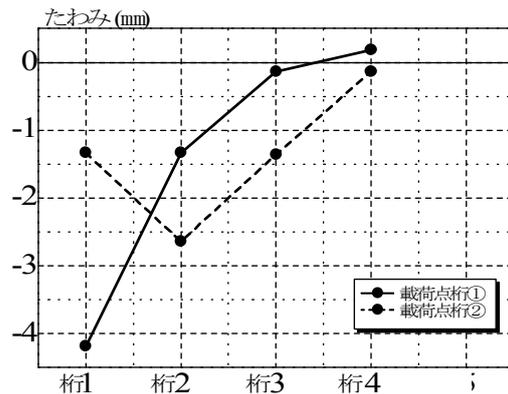


図-13 4主桁モデルのたわみ分布 (主桁 E-70, 床版 E-50)

5. 結論

小規模木桁橋に対する載荷試験を行うことにより、木橋の基本的な挙動を知ることができた。さらに、試験結果をもとに構造解析の条件を整理し、これをもとに床版等の部材が橋全体の挙動に与える影響を検討した。以下に本研究から得られた見解を列挙する。

- ① 載荷試験により、木桁橋の横方向の荷重分配に対し床版がその効果を有することが確認された。また、地覆が曲げ部材として作用することがわかった。
- ② 載荷試験及び構造解析により、木材の異方性と部材間の接合状態を考慮することが、解析条件においては重要であることがわかった。また、地覆が橋全体に及ぼす影響を桁の剛性の向上に置き換えることで把握することができた。
- ③ 構造解析により、今回の大きさ程度の木桁橋では、必要以上に地覆断面を大きくしても、その大きさに見合った曲げ部材としての効果は期待できないことがわかった。また、荷重分配効果は床版厚に比例すること、荷重分配の影響については、主に、載荷した桁に隣接する桁までを考慮すればよいことがわかった。

今回の検討は小規模な木橋を対象としたため、桁に対する床版や地覆の断面寸法が比較的大きいものであった。そこで、今後は一般的な木桁橋への適用を目的とし、木橋のプロポーシヨンの変化等による影響について解析モデルを用いて確認する必要があると考えられる。

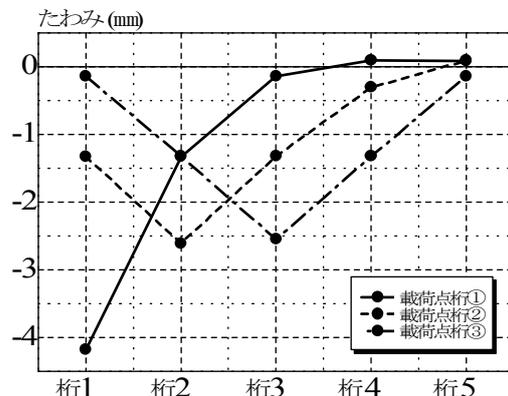


図-14 5主桁モデルのたわみ分布 (主桁 E-70, 床版 E-50)

参考文献

- 1) 上月裕, 渡辺浩, 山尾敏孝: 木歩道橋のコスト評価と環境負荷に対する検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.845-852, 2006.
- 2) 針葉樹の構造用製材の日本農林規格 機械等級製材
- 3) 構造用木材の強度試験法: 住宅資材性能規定化対策事業, 地域材性能評価事業, 農林水産省補助事業, pp.3-5, 1999.
- 4) 日本建築学会: 木質構造設計基準・同解説, 1995
- 5) MSC.MarcUsers Manual Volume A-E: Msc Software, 2003.
- 6) 森林総合研究所: 木材工業ハンドブック, p135, 2004.

(2006年9月11日受付)