

## 小規模木桁橋の挙動の実験的及び解析的検討

Experimental and analytical examination of the behavior of short spanned timber girder bridges

○上月裕\* 渡辺浩\*\* 松本剛\*\*\* 山尾敏孝\*\*\*\*

KOUZUKI Yutaka, WATANABE Hiroshi, MATSUMOTO Tsuyoshi, and YAMAOKA Toshitaka

- \*工修 熊本県 環境生活部 (〒862-8570 熊本市水前寺 6-18-1)  
\*\*博 (工) 福岡大学 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)  
\*\*\*修 (工) 横河工事株式会社 (〒170-8452 東京都豊島区西巣鴨 4-14-5)  
\*\*\*\*工博 熊本大学 大学院 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

**ABSTRACT** Recently, A large number of the timber bridges were constructed. Most of timber bridges was the pedestrian bridges with short spanned length and was mainly used a simple girder type. The loading test is performed to investigate the behavior of short spanned timber bridges. The numerical analysis is carried out by changing material properties and boundary conditions of connection parts. The details of behavior are investigated, comparing results of lading test and numerical analysis. As a result, the behavior of each member was able to be confirmed. The tendency to the behavior of the timber bridge was able to be confirmed by combining some analysis conditions.

**Keywords:** 荷重分配、載荷試験、構造解析、木歩道橋  
*load distribution, loading test, structural analysis, timber pedestrian bridge*

### 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、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等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 に示すような小規模木歩道橋である。

例えば熊本県においては、県内の木橋の約 80% が公園や遊水池等に架かる小規模木歩道橋であることが判っている<sup>1)</sup>。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が、これまで用いられた薬剤処理に加え、構造形式における対策も必要となってきた。対策方法の一つとして、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などを出来るだけな

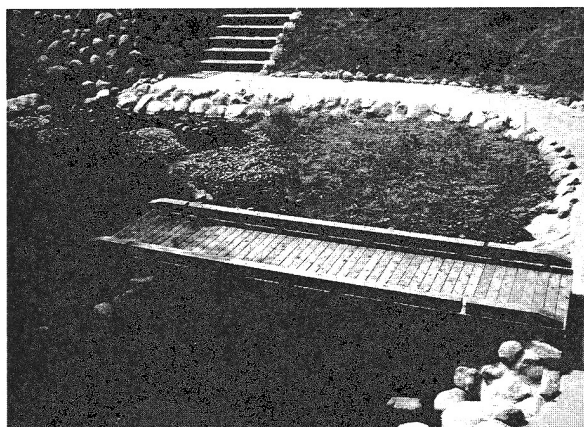


写真-1 小規模歩道木橋の例

くすために、部材を減らすということが考えられるが、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になってくる。しかし、このような小規模な単純桁橋に関する研究はほとんど行われておらず、その挙動が明らかでないというのが現状である。

以上のことから本研究では木歩道橋の合理的な形状検討の基礎的研究として、実橋への載荷試験と構造解析により、床版や地覆が構造材料として橋全体に与える影響についての検討を行った。

## 2. 対象橋

本研究の対象とした橋は、熊本県阿蘇市に河川環境整備の一環として計画され、平成17年3月に竣工した木歩道橋で、支間1.2m、有効幅員1.0mの小規模な3主桁単純桁橋である(写真-3)。構造の詳細を図-1に示す。写真や図からわかるようにシンプルな構造で接合部を出来るだけ少なくし、床版と主桁の間に遮水シートを設けるなどの防錆対策もなされており、耐久性の向上が図られている。使用材は地元産のスギ材を用いており、設計条件は、主桁がスギの機械等級区分<sup>2)</sup>におけるE-70(5,900~7,900N/mm<sup>2</sup>)、床版がE-50(3,900~5,900N/mm<sup>2</sup>)となっている。桁と床版の固定には、それぞれコーススレッド(木ネジ)2本が用いられており、また地覆は床版にボルトによる接合がなされている。

## 3. 載荷試験による挙動の検討

### 3.1 桁材の性能確認

本研究では、正確な部材の性能を確認するために桁材のヤング係数の測定を行った。測定方法として曲げたわみ法を用いた。曲げ試験は支間を実支間と同様の1,200mmにし、100kgの荷重を載せ、たわみを測定し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7,177 N/mm<sup>2</sup>を示しており3主桁とも設計強度の許容値5,900N/mm<sup>2</sup>を上回っていることがわかる。



写真-2 木橋に見られる腐朽の例

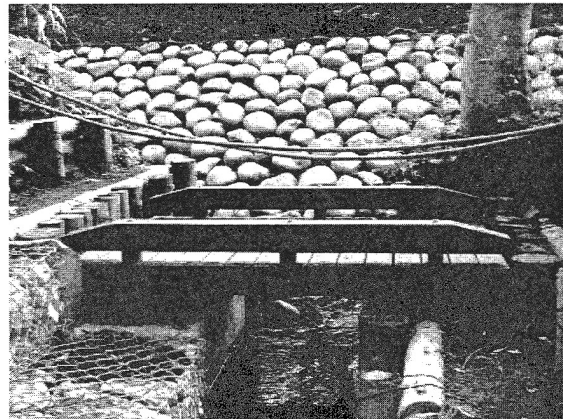


写真-3 対象橋全景

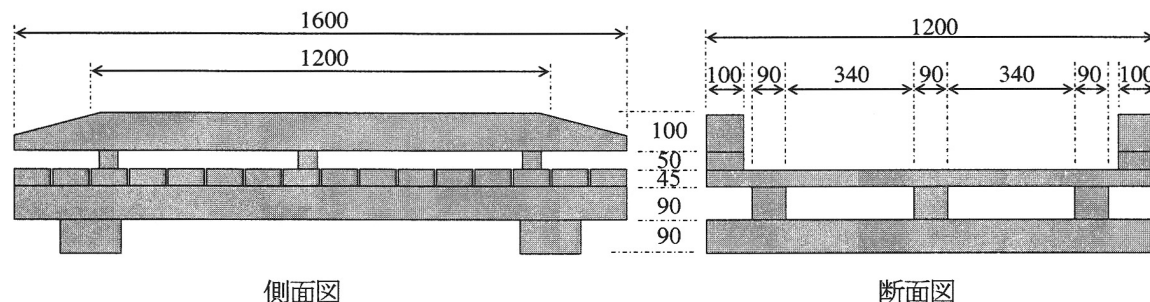


図-1 対象橋の寸法 単位：mm

### 3.2 載荷試験の概要

載荷試験については、写真4に示すように対象橋を現場より実験室へ搬入し試験を行った。載荷方法は図2に示すように単純支持で支間中央への1点載荷で行った。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たうえで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110kgfを載荷した後、短期許容応力<sup>2)</sup>から算出した最大荷重660kgfまで載荷した。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よう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。また、載荷ケースは図4に示す2ケースとし、各2回ずつ測定した。

表-1 ヤング係数測定結果

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

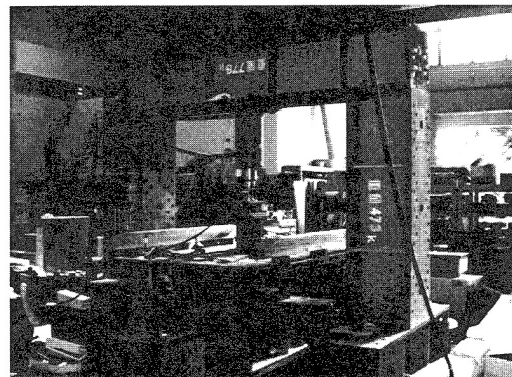


写真4 載荷試験の様子

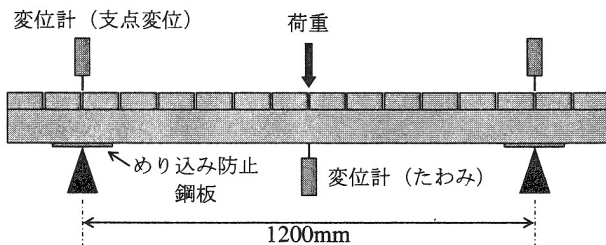
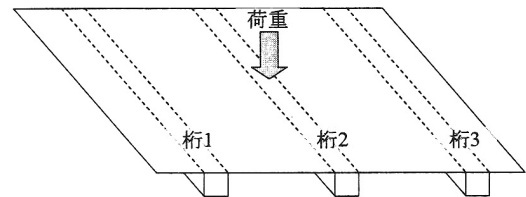
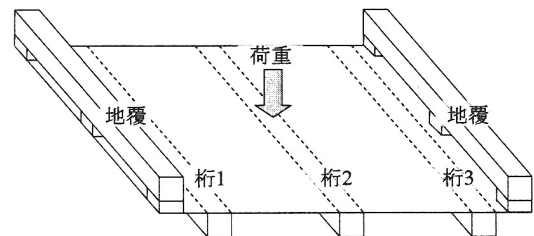


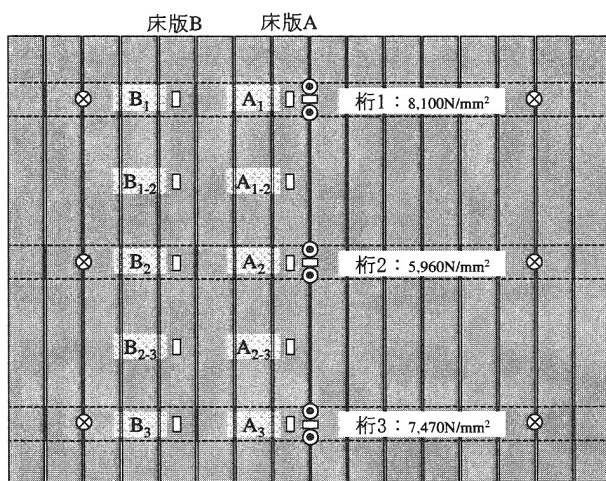
図2 載荷試験の概要



(a) 載荷ケース1  
(中央載荷・地覆無し)



(b) 載荷ケース2  
(中央載荷・地覆有り)



- 変位計 (たわみ)
- ひずみゲージ (桁下縁)
- ⊗ 変位計 (支点変位)
- ひずみゲージ (床版上縁)

図3 変位計、ひずみゲージ設置箇所

図4 載荷ケース

### 3.3 荷重試験の結果と検討

図5~7は荷重ケース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。それぞれの荷重ケースについて2回の荷重を行ったが、荷重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と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荷重2回目の結果をもとに行った。

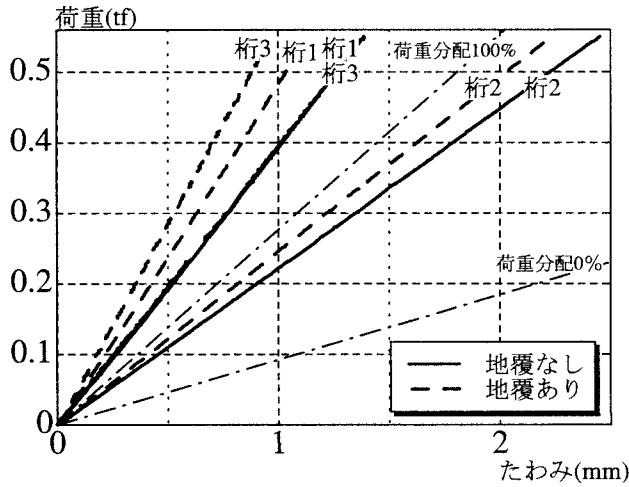


図5 荷重とたわみの関係

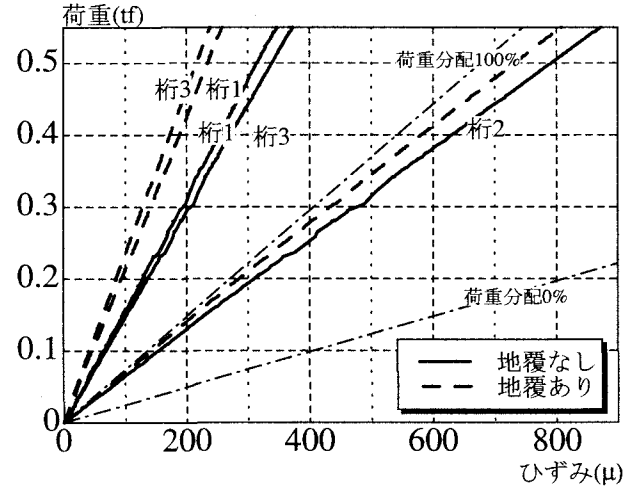
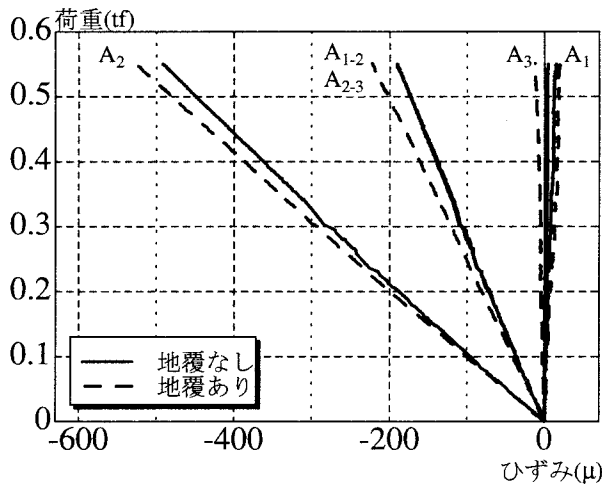
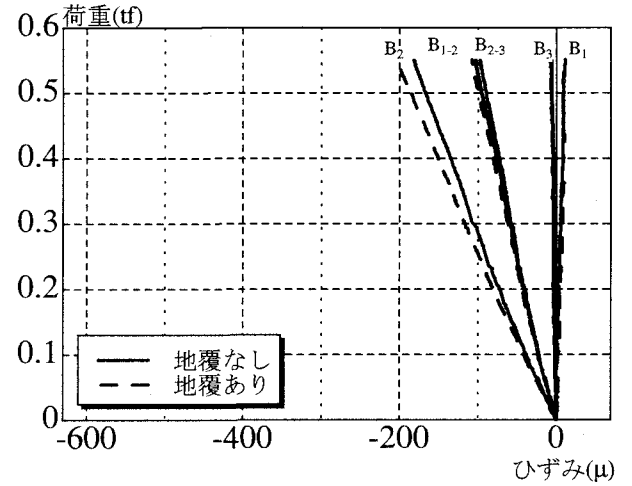


図6 荷重と桁ひずみの関係



(a) 床版 A



(b) 床版 B

図7 荷重と床版ひずみの関係

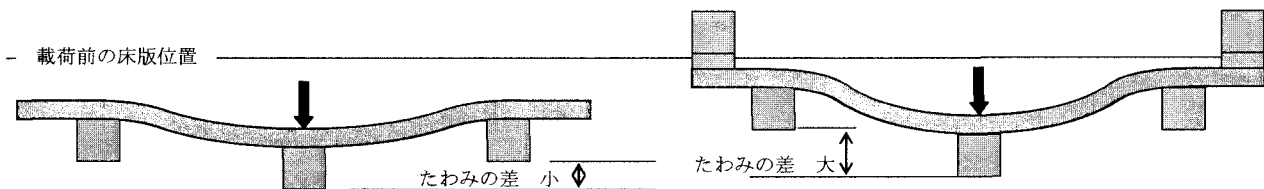


図8 床版の変形の比較

図-5、図-6の実線は載荷ケース1（地覆なし）の挙動を、破線は載荷ケース2（地覆あり）の結果を示したものである。載荷ケース1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場合は、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、対象橋の各桁のヤング係数が違うため、桁2のヤング係数をもとにしている。実験値は荷重分配100%側に近く、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割が分配されていることになる。

載荷ケース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、地覆がない場合に桁1と3のたわみに差がなかったことに対し、地覆がある場合で差が見られ、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。これらの原因として、桁1側と桁3側とで取り付けられた地覆のヤング係数が異なっていたと考えられる。

また、図-7より床版のひずみは桁と逆に地覆がある場合において大きくなっていることがわかる。これは図-8に示すように、地覆がない場合に比べ全ての桁においてたわみが減少しているが、地覆の取り付け位置に近い桁1、3でたわみの差が大きくなることで床版の変形が大きくなり、ひずみが増加したためと考えられる。

#### 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、より詳細な木橋の挙動を検討するために、汎用解析プログラムMARC<sup>3)</sup>を用いて構造解析を行った。

図-9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。床版は支点間の12本のみを要素化しており、桁と床版の間に設けた要素により、床版要素を高さ方向に桁と床版の中立軸の間隔だけ移動させ、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なっている。

表-2に示す3つの解析条件に基づいた解析結果と載荷ケース1における実験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。

表-2 解析条件の比較

解析条件	材料特性	部 材				床版	接合条件
		定 数	桁1	桁2	桁3		
条件①	等方性	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	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 <sup>2</sup> )	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 <sup>2</sup> )	8,729	6,423	8,050	6,900	条件①と同様
		せん断弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	757	557	698	598	
		ポアソン比	0.5				
条件③	異方性	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	8,729	6,423	8,050	6,900	桁と床板間をヒンジとする
		せん断弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	757	557	698	598	
		ポアソン比	0.5				

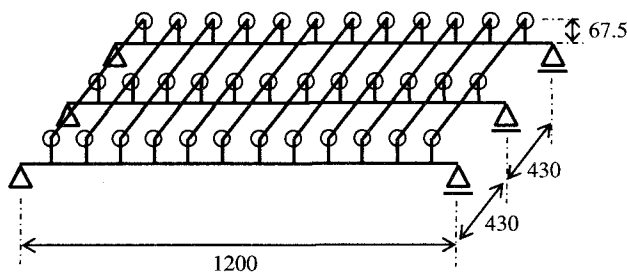


図-9 床版と桁の接合部を考慮したモデル

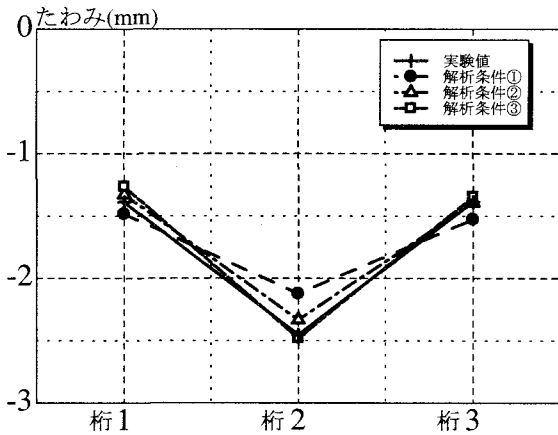


図-10 実験と解析のたわみの比較

#### 解析条件①

解析条件①では、簡易な条件で木橋の解析が可能であるかを検討した。木材は異方性材料であるが、ここでは等方性材料として扱い、桁のヤング係数については架設前の各桁の実測値を用いた。床版の設計ヤング係数は E-50 であったが、実際にサンプル調査として 2 本の床版のヤング係数を測定した結果、E-70 以上の値が得られたことから、床版は E-70 (6,900N/mm<sup>2</sup>)とした。ポアソン比は木材工業ハンドブック<sup>4)</sup>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-10 の破線は解析条件①における各桁の中央横断面のたわみを示している。実線で示す実験値に比べ、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<sup>4)</sup>。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、この影響が重複されないように構造用木材の強度試験法<sup>5)</sup>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-10 に解析条件②の解析結果を一点鎖線で示している。解析条件②を考慮した場合、解析条件①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。

#### 解析条件③

解析条件③では、床版と桁の固定にコーススレッドが用いられていることを考慮し、解析条件②に加え、図-9 に○印で示す床版と桁との接合部をヒンジとした。

図-10 に解析条件③の解析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。また、床版と桁の接合部を剛結とした解析条件②とヒンジとした解析条件③の結果の間に桁2と桁3の実験値が含まれることから、実橋の挙動については接合部の回転剛性の値を検討することによって、より適切な解析を行うことができると考えられる。

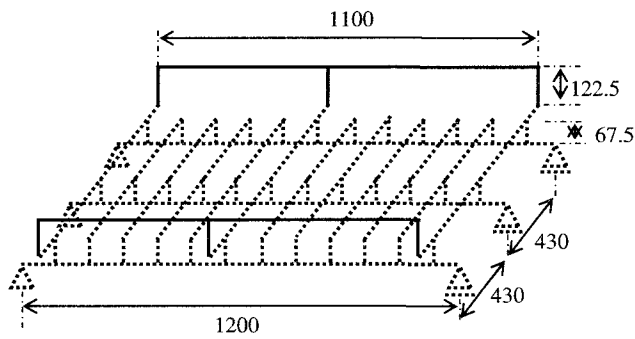


図-11 地覆モデル

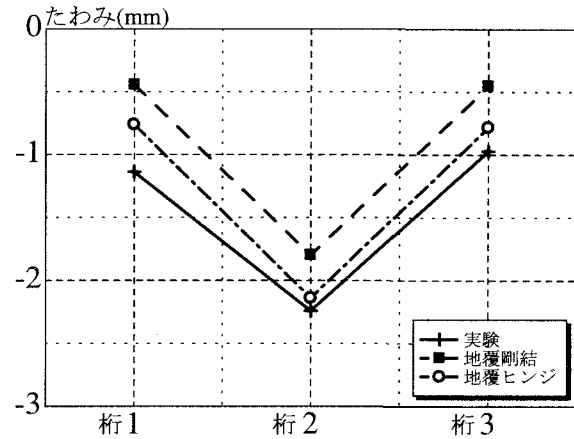


図-12 地覆モデルによる解析

以上のことから解析条件の組み合わせにより、木橋の挙動を把握することが可能であることがわかった。載荷ケース1では解析条件③を考慮した場合に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っていくこととする。

#### 4.2 地覆の曲げ部材としての性能

載荷ケース2の実験結果をもとに、地覆が曲げ部材として橋全体に与える影響について構造解析により検討を行った。

構造解析にあたり、図-11に示す地覆を要素を考慮したモデル（以下、地覆モデル）を作製した。図中に実線で示される部分が地覆の要素で地覆のヤング係数は $E-70 (6,900\text{N/mm}^2)$ とした。

地覆の接合部は剛結とし、地覆に完全に荷重が伝わると考えた場合の地覆の効果を確認した。図-12に地覆モデルでの解析結果を破線で実験の結果を実線で示している。これを見ると、解析では実験と比べ、全体的にたわみが小さくなっていることがわかる。また、図-12の一点鎖線は、実際は対象橋においてボルト接合となっている地覆接合部を、解析モデルではヒンジとして解析した結果を示している。全体のたわみが大きくなっていることから、床版と主桁のコースレット接合と同じようにボルトによる接合もヒンジに近い挙動になっていると考えられる。

次に、地覆要素のないモデル（図-9）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-13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なり、 $2EI$ 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いることがわかる。この間で桁1、3の剛性の値を変えていくと $1.4EI$ 付近で解析結果と実験結果がほぼ等しくなる。このことから、地覆の曲げ部材としての効果は4割増し程度であると判断でき、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。

図-14は地覆の高さの変化とたわみの関係を示したものである。ここでは、解析モデルにおいて、桁のおよび地覆のヤング係数を $E-70 (6,900\text{N/mm}^2)$ 、床版のヤング係数を $E50 (4,900\text{N/mm}^2)$ とし解析を行った。地覆の高さを変化させても桁のたわみはほとんど変化しておらず、地覆断面を大きくしても地覆の曲げ部材としての効果は期待できないと考えられる。



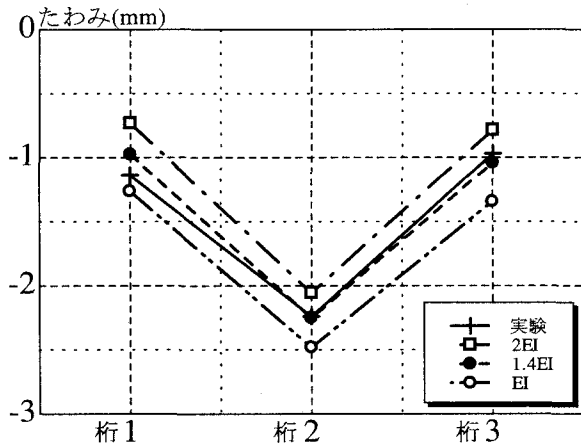


図-13 曲げ剛性の置き換え

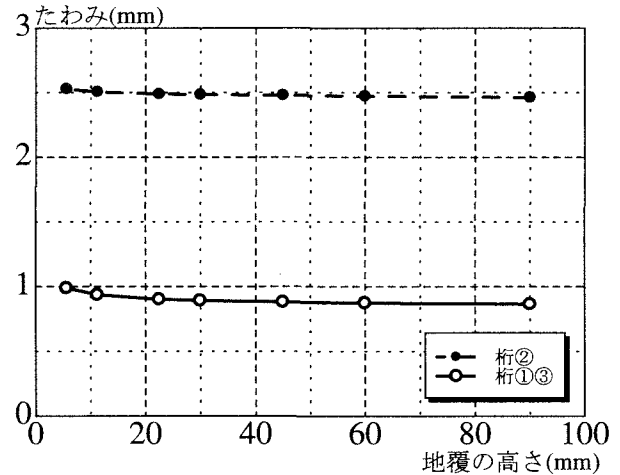


図-14 地覆高さとなわみの関係

## 5. 結論

本研究では小規模木歩道橋を対象とし、載荷試験により基本的な木橋の挙動の確認を行った。さらに、その結果をもとに木橋の構造解析を行い、解析条件を検討するとともに部材レベルでの木橋の挙動の把握を試みた。以下に本研究から得られた見解を列挙する。

- 載荷試験で得られた結果をもとに解析モデルを検討した結果、小規模木橋の挙動の概要を知ることができた。その際、解析条件として、木材の異方性と部材間の接合状態を考慮することが重要であることがわかった。
- 載荷試験の結果から、木歩道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。解析における接合状態の検討から、床版の荷重分配は桁との接合方法によって変化するといえる。
- 載荷試験の結果から、地覆が曲げ部材として作用していることがわかった。さらに構造解析により、地覆が橋全体に及ぼす具体的な影響を、地覆の取り付け位置に近い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。また、地覆の曲げ部材としての効果は地覆断面を大きくしても期待できないことがわかった。
- 今回の対象橋は小規模であったため、桁に対する床版や地覆の断面寸法が比較的に大きいものであった。そこで、今後は木橋のプロポーシヨンの変化による影響を、解析モデルの部材寸法を変更することにより確認する必要がある。

## 参考文献

- 1) 上月裕、渡辺浩、加藤雅史：木歩道橋の試設計とコスト評価の一例、第3回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集
- 2) 日本建築学会：木質構造設計基準・同解説、1995
- 3) MSC.Marc Users Manual Volume A-E：Msc Software, 2003
- 4) 森林総合研究所：木材工業ハンドブック、2004
- 5) 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、1999