

スギ素材を活用した積層桁車道橋の提案

A proposal of short road bridges composed of coupled sawing lumber beams made of Japanese cedar

渡辺 浩*, 小松 幸平**

Hiroshi WATANABE and Kohei KOMATSU

* 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)

** 農博 京都大学教授 生存圏研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

Many huge timber structures were constructed recently, because of protecting global environment and forests. Forest resources are ecological materials, and they should be used especially on public construction. A short road bridge utilized for regional forest resources is proposed in this paper. It is composed of coupled sawing lumber with large cross section and glued with each other. The model bridge based on this idea is introduced. Ultimate loading tests of coupled sawing lumber beams used on this bridge are carried out in order to confirm its ultimate performance. Loading test for real bridge was also carried out and reported.

Key Words : forest resources, coupled beam, loading test, road bridge

キーワード : 森林資源, 積層桁, 載荷試験, 道路橋

1. まえがき

かつて土木構造物から木製のものが消えていった理由には, 木材の性能の他に, 以下のような天然資源ゆへの資源供給における問題も大きかったと考えられる。

そのひとつは資源の蓄積に時間を要することである。木材は自然のなりわいの下で資源化, 再資源化がなされる。この点が消費する一方の化石資源等とは大きく異なりエコマテリアルとも言われる理由である¹⁾が, 安定的に供給されるためには森林が適切に管理されつづける必要がある。豊かな森林を有する我が国が世界最大の木材輸入国でもあるのは, かつての乱伐により高度成長期の木材需要に応えられなかったこととも無関係ではない。

もうひとつは長尺や大断面の部材が自由に得られないことである。このため構造物の大型化や設計荷重の増加といった時代のニーズに対応することは容易ではなかった。

これに対して近年では車道橋や木製ドーム等のように, 従来では考えられなかった大規模な構造物が建設されるようになってきている²⁾。森林が成熟し, 利用価値が高い径のものも豊富に蓄積されるようになって

いる上, それらの構造物の多くで利用されている集成材では短尺, 小径の原木からでも長尺, 大断面の部材が製作できるため資源の有効利用も図れる。

しかしながら, このような積極的な取り組みの事例を見ると地球環境や地域環境問題に配慮した木質資源の有効利用が大きな動機のひとつであることが多い。京都議定書の達成のためには, 環境負荷の小さい素材への転換が求められている。また我が国の多くの森林では利用されないがための過密による荒廃が進みつつある。このような背景から, 特に森林土木の分野で木材の積極的な利用が図られてきている。

例えば京都府では径が20cm以下の比較的小径の地域産スギ材による木製治山ダムが多数供用されている³⁾。これらの技術は他の地域にも活かされており, 例えば秋田県では資源的に余裕がある30cm超のスギ材による治山ダムが開発される⁴⁾など, 地域の資源の蓄積状況に応じた取り組みが進められている。

木橋は前述の理由から集成材によるものが多いが, 集成材の製造にはある程度の規模の工場を必要とするため, 豊富な森林資源を有する地域の中でも製造拠点は自ずと限られる。本研究では, 以上の観点から小規模ではあるが地域の資源を地域の手で活用できる車道橋を提案することを目的とする。そこで, 京都府

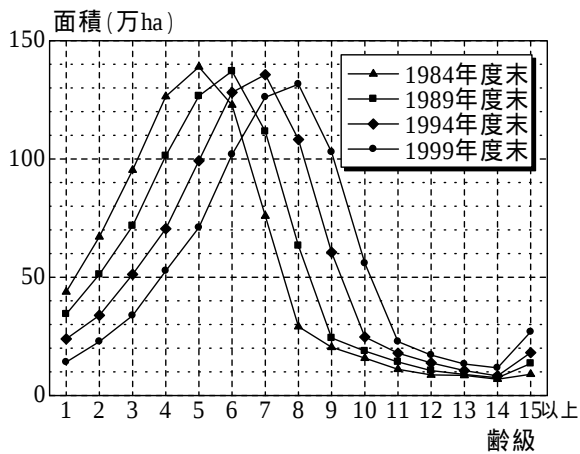


図-1 民有林の森林資源構成⁵⁾



写真-1 モデル橋

丹後地域を例に森林資源の状況を分析し、それらの活用を目的としたモデル橋を紹介するとともに、そのために開発された積層木桁の性能試験とモデル橋における性能確認のための試験について述べる。

2. 本取り組みにおける考え方とモデル木橋

2.1 森林資源の特徴

先進国でも稀な森林大国である我が国は国土の66%を森林が占めるが、さらにその40%は人工林である⁵⁾。人工林はすでに人為的な管理により成り立っているものであるから、利用せずに放置することが森林保護ではあり得ない。すなわち適度な伐採と利用により健全度が保たれる。我々が目指すべき木材の有効利用とは主にこの人工林の資源を対象とするべきである。

人工林の樹種ではスギ、ヒノキ、カラマツが多い。最も多いのはスギで人工林の約40%を占めるが、特に西日本でその割合が多い。一方でカラマツは主に比較的寒冷な東日本に多い等、樹種の特性や気候を考慮し

た植林、育林がなされている。

図-1は我が国の人工林の年齢級の分布である⁵⁾。ただし1年齢級は5年に相当する。戦後の植林と拡大造林政策等のため極端なピークを有する構成になっているが、さらに特筆すべきは未利用であるためそのピークがほぼ右に移動していること、そして新しく植林されないため、さらにいびつな構成となっていることである。このため、我々が積極的に利用すべきはよく言われる小径間伐材ではなく、このピークに相当する8～10年齢級の材であることがわかる。この8～10年齢級とは、例えばスギであれば品種や地域等で成長速度は異なるものの樹高は15～20m、径は30～40cmである。

モデル地域である丹後地域でも人工林ではスギが大半を占めている。年齢級のピークは7～10年齢級とわずかに若いものの、構成そのものは全国的な傾向と同様である。このため、元口側、すなわち太い方の径が30～35cmである原木の使用が前提となる。

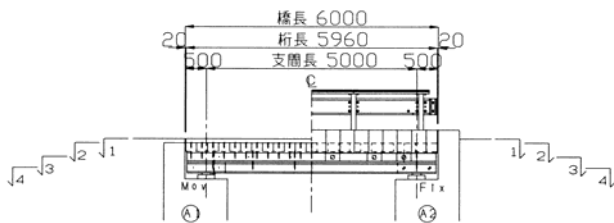
2.2 モデル橋の概要と考え方

森林資源を搬出するために存在する林道には、その性格から10mを超える橋はほとんどない。すなわち今後の汎用性を考えてもモデル橋は橋長が数mの規模で十分である。ここでは、国道から広域基幹林道が分岐する位置に新設される橋をモデル木橋とすることにした。橋長は6mの直橋で有効幅員は交差点に近い9mと大きい。また縦断勾配が1.6%であるため横断勾配は取られていない。写真-1はモデル木橋である。

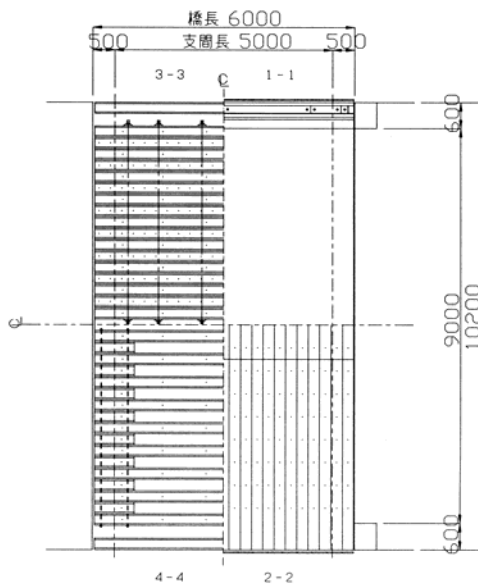
小規模であることから、ごく一般的な単純桁橋が検討されたが、245kN A活荷重に相当する1等林道橋⁶⁾で設計した場合、使用すべき径の材は主桁にはわずかながら小さいことがわかった。そこで、それらを上下2段に積層して主桁材とする積層木桁を開発し利用することとした。積層桁に関する設計法は建築学会木質構造設計基準・同解説⁷⁾において簡単に紹介されているが、それらは建築材を想定した小断面の製材を対象としたものである。そこで後述のような耐力試験を実施した。

設計の結果、図-2のような断面を有する橋が架設されることになった^{8) 9)}。主桁材は267mmとなるように4面を挽いた角材を上下に2本重ね、ウレタン系接着剤で一体化されている。また相互の桁には6本のボルトまたは鋼棒(SS400材相当)が設置されており、一体化とともにせん断補強の役割を担っている。この積層桁と積層しない桁と交互に配置し、幅員方向に鋼棒で緊張されている。

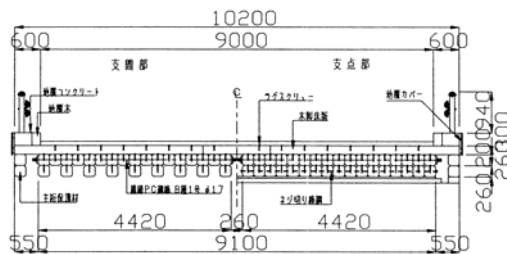
各部材は元口側では正方形断面であるものの、原木の径が変化するため末口側、すなわち細い側では写真-2のように隅角部に丸みを有するものも多い。これは、丸みを含まないようにするためにはもう一回り大き



(a) 側面図



(b) 平面図



(c) 断面図

図-2 モデル橋の一般図

い原木が必要となるため、資源への負担を減らそうとの配慮からである。このため本橋では曲げ応力が最大となる長さ方向に中央の断面に丸みがないことを桁材の条件とし、さらに設計では木桁の剛性を矩形断面の80%であるとして設計することで、丸みは許容することとした。

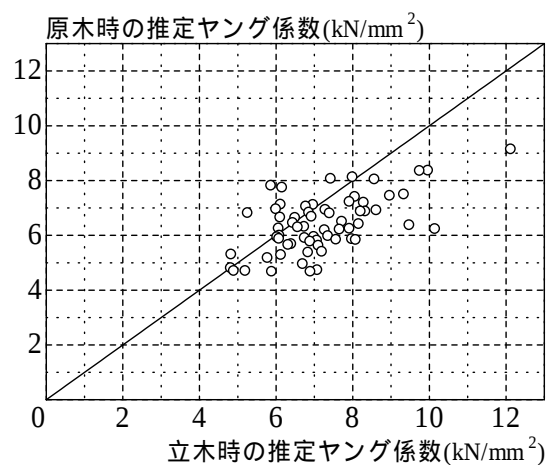


図-3 立木と原木時のヤング係数の関係

部材では接着面に背割りを設けることになり機能しない可能性がある。また横面に設けるとせん断破壊が助長される可能性がある。そこでここでは、スギの乾燥割れに関する研究成果¹⁰⁾に基づき、問題となるような大きな割れが側面や上面に生じないように、各部材上面に対し深さ 3cm のスリット状の鋸目を与え、断面形状の安定化を図っている。上下の桁間に設置される鋼棒とボルト 6 本は上記の鋸目を避けるため、部材直角方向に千鳥状に配置している。

床版材は 200x267mm のものが主桁に直交して敷き詰められている。ただし床版材は図-2 のように 3 分割されている。また主桁部も幅員方向の左右が独立している。これは本橋の有効幅員が 9m と大きいことから、将来の補修時においても片側ずつ作業することで片側通行が可能となるように配慮されたものである。

本橋の設計寿命は概ね 30 年とされている。維持管理としては一般の橋梁に準じるが、木橋の耐久性を支配するのは雨水であるため、桁材に木材水

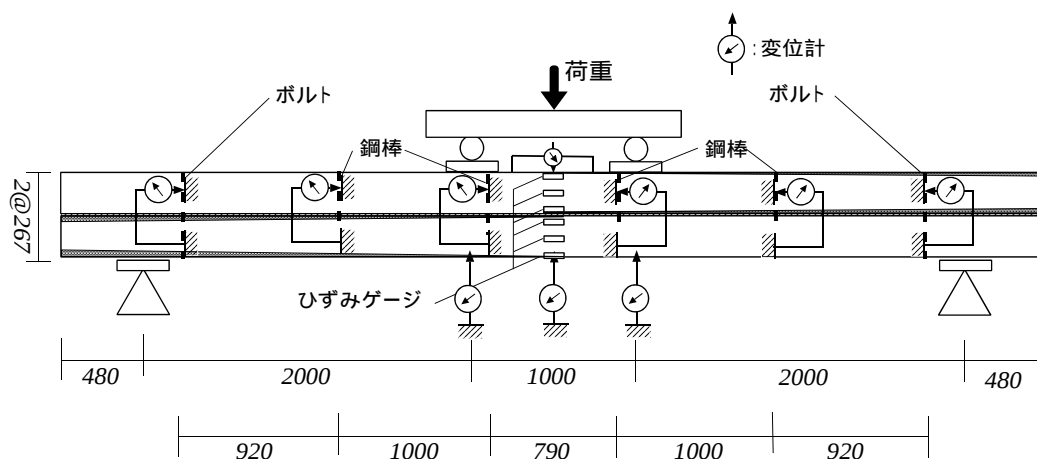


図-4 積層木桁試験体と載荷試験の概要

分計を埋め込みその変化を定期的に測定すること
にしている。

2.3 資材の調達と工夫

本橋の製作にあたっては材長 6m の原木が 116 本必要であった。しかしながら材長 6m の原木の流通量はあまり多くなく、これらを市場で調達しようとすると混乱を招きかねないことから、独自に伐採・調達することとした。ただし、個々の樹木の寸法や性質にはばらつきがあるため、伐採・調達してから性能を確認すると利用できないものが多く含まれる可能性があり、資源の有効利用やコストの面から好ましくない。ここで木材の強度は概ねヤング係数と比例するといわれている。そこで、立木の段階で応力波伝搬速度測定装置によりヤング係数を推定し、要求性能を満足する原木が必要数確保できるように選択して伐採・調達した。

また加工前の原木に対して縦振動法によるヤング係数の測定を行った。図-3 は伐採・調達した立木と原木時のヤング係数の関係を示している。精度は高いものの両者には相関が見られ、立木の時点でヤング係数を測定することの有意性が示されている。この結果を踏まえ、原木時のヤング係数測定の結果より、強度が高いものから重要な部材である桁材に使用し、次いで床版材、最後に駒止め材と桁化粧材に使用した。その結果、今回調達した原木の 97%超を使用することができた。

2.4 予備試験の実施

次の 3 章で述べる積層桁の性能確認試験（以下本試験という）に先立ち、積層桁の有効性を検討するための予備試験が実施された。これらは文献 11) に詳しく報告されている。予備試験では本試験とほぼ同様な試

験が実施されているが、主な相違点は主桁材が 4 面挽きではなく 2 面挽きのいわゆるタイコ材であること、エポキシ系接着剤が使用されていること、鋼棒およびボルトの本数は同じであるが断面中心の直線上に配置されていることである。

ウレタン系接着剤はエポキシ系接着剤と比較して強度には劣り、養生期間が必要であるものの耐候性に優れ自己充填性もあることから、本橋のように屋外におかれ、また水平面で雨水の滞留が懸念される積層面での使用は望ましいと考えられる。予備試験と本試験で結果の違いをもたらす大きな違いはこの接着剤の違いと考えられたが、結果としては両者に大きな違いは見られなかったため、ここでは詳述は控えることにする。

3. 積層桁の性能確認試験

3.1 試験の概要

モデル橋の製作において、積層桁を 4 組余分に製作し、性能確認のための終局載荷試験を実施した。これらの概要については文献 12) にも報告されている。

試験体は図-4 のように高さ・幅が 267mm に 4 面挽きされた素材がウレタン系接着剤で一体化されている。また上下の桁間には径 20mm のボルト 2 本と 16mm のラグスクリュー 4 本が設置されている。表-1 は試験体に使用された 8 本の素材の立木時、原木時および試験終了後に未破壊部分から採取した小試験体によるヤング係数と強度の測定結果を示している。

材料が JIS 普通構造材相当であるとした場合、断面と曲げ性能は表-2 のとおりとなる。厳密にはこれらの試験体は断面寸法も素材としての性能も異なるが、本論文ではこれらを設計値として検討を進めることにする。

表-1 使用した部材の特性

試験体		小試験体 (35×88×700) 3点曲げ試験		丸太での 動的 ヤング係数 (kN/mm ²)	立木での 動的 ヤング係数 (kN/mm ²)
		最大応力 (N/mm ²)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)		
B-11	上部材	32.9	6.17	-	-
	下部材	46.8	6.11	-	-
B-12	上部材	29.4	5.98	-	-
	下部材	36.0	5.53	-	-
B-13	上部材	38.8	7.68	6.84	-
	下部材	43.9	5.85	7.74	6.16
B-14	上部材	37.1	4.59	6.63	6.50
	下部材	43.2	8.23	7.22	7.91

表-2 積層木桁の断面と曲げ性能の設計値

設計曲げ強度		7.4N/mm ²	(備考)JIS 普通構造材 相当とする
設計ヤング係数		6.9 N/mm ²	
断面 2 次モーメント	完全接着	2,710,000,000 mm ⁴	(備考)丸みを考慮して 80%とする
	完全非接着	678,000,000 mm ⁴	
剛性	完全接着	7.61 kN/mm	
	完全非接着	1.90 kN/mm	
設計荷重		75.1 kN	
設計荷重時たわみ		9.87 mm	

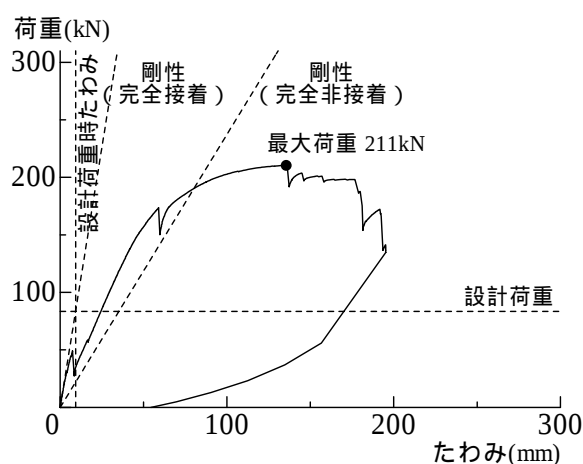
図-5 中央のたわみと荷重の関係と
実断面による設計値 (B-11)

写真-3 中央部の破壊の様子 (B-13)

載荷試験では、図-4のように1mの等曲げ区間を有する載荷を変位制御により行った。写真-2は載荷試験の様子である。

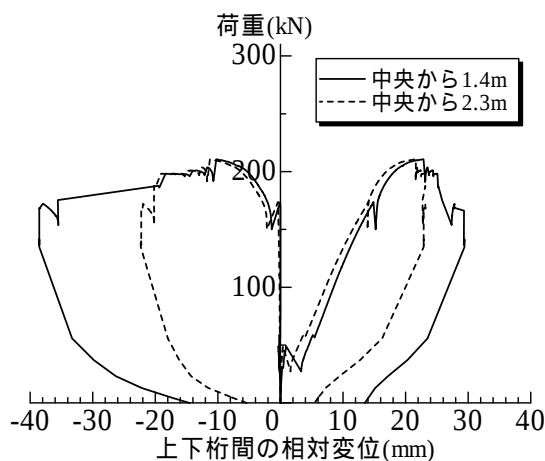
3.2 結果と考察

図-5はB-11の中央のたわみと荷重の関係を示している。図中の斜めの点線は表-2の接着が完全な場合と全く接着効果がない場合の剛性を、また水平と鉛直の

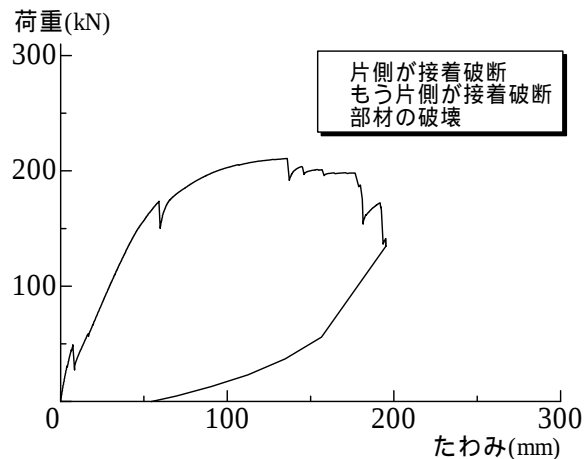
点線は設計荷重とそのときのたわみを図示したものである。

試験では、載荷が進むにつれて幾度かの破裂音とともに荷重が低下し、最大強度付近で中央部分の曲げ破壊が生じた。写真-3はその時点での試験体側面の様子である。ただし、最大荷重以降も荷重は急減せず、非常にねばり強い挙動を示した。

幾度かの破裂音は図-6により考察することができ



(a) 上下桁間の相対変位の変化



(b) 中央のたわみと荷重の関係

図-6 上下桁間の相対変位の変化と考え方 (B-11)

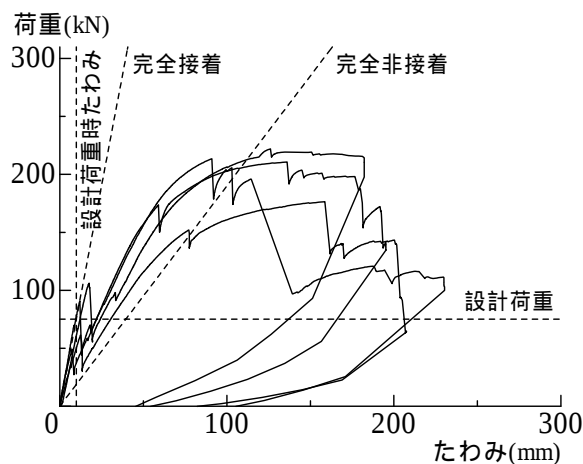


図-7 中央のたわみと荷重の関係と設計値のまとめ



写真-4 試験終了後のボルトの様子 (B-11)

表-3 試験結果のまとめ

	初期剛性*		接着面の最初のせん断破壊時荷重		最大荷重		最大荷重時たわみ	
	kN/mm	比*	kN	比*	kN	比*	mm	比*
B-11	6.22	0.82	49	0.65	211	2.81	136	13.78
B-12	4.93	0.65	61	0.81	177	2.36	159	16.11
B-13	8.54	1.12	91	1.21	213	2.84	91	9.22
B-14	7.01	0.92	102	1.36	222	2.96	126	12.77

*荷重 10kN ~ 50kN の区間による

**表-2 の完全接着の場合の計算値との比

る。図-6(a)は B-11 の上下桁間の相対変位と荷重の関係を示したものである。まず 50kN 載荷時点では右側の接着が破断し、次に 177kN で左側の接着も破断し、211kN 以降はその変化が複雑になっていることがわかる。幾度かの破裂音のうち特に大きい3回はいずれもこの時点であった。また図-6(b)を見ると、それらの

前後で傾きが変化しており、試験体に大きな変化が生じたことがうかがえる。

図-7 は 4 試験体すべての結果を重ねて示している。厳密にはこれらの試験体は断面寸法も素材の性能も異なるが、いずれの試験体もほぼ同様な挙動を示していることがわかる。



写真-5 モデル橋の載荷試験の載荷の様子



写真-6 モデル木橋の載荷試験の測定の様子

表-3 は荷重 - たわみ曲線の傾きである初期剛性、およびせん断破壊時、最大荷重時の結果を計算値との比とともに整理したものである。初期剛性は計算値の 0.65 ~ 1.12 倍と小さかった。木質構造設計基準・同解説では接着積層桁の剛性は全断面有効の 90%とするという規定があるが、本試験結果ではこれを下回る上ばらつきも大きい。これは大断面である上製材所の土場での作業であったため積層桁の接着積層時の圧縮が十分ではなかったためと考えられる。今後は圧縮器具を使用した十分な圧縮作業が望まれる。また、接着面の最初のせん断破壊時の荷重も設計値の 0.65 ~ 1.36 倍と 1 を下回るものもあった。これについても同様に考察できる。

一方で最大荷重は設計値の 2.16 ~ 2.67 倍であり、十分なレベルにある。またそのときのたわみは 10.1 ~ 17.4 倍ときわめてねばり強い挙動を示している。また最大荷重発生後もしばらくは設計最大荷重以上を負担する能力があることがわかる。これらは写真-4 に示すようにボルトや鋼棒が積層面付近で曲げ変形しな

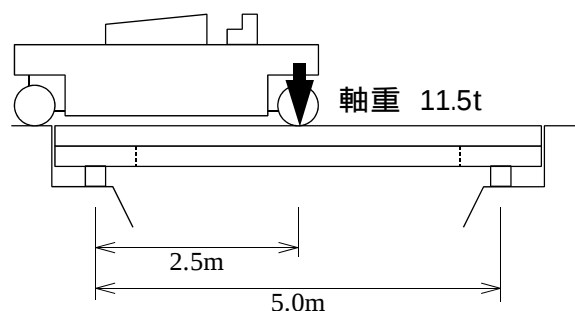


図-7 モデル橋の載荷試験の様子

表-4 モデル橋の載荷試験の結果

		変位
試験結果	載荷側	1.0mm
	非載荷側	0.5mm
計算値(積層桁のみ考慮)		1.6mm
計算値(全桁を考慮)		1.2mm

がら桁材にめり込んだためと考えられる。

4 実橋の挙動の確認

モデル橋の舗装工事時に、写真-5 のような簡易な載荷試験を実施した。試験では舗装作業用の車両を使用し、図-7 のように後輪を支間中央、前輪を橋梁外になるように配置した。後輪軸重は 11.5t であり、これは設計荷重の約半分に相当する。本橋の主桁構造は幅員方向に 2 分割されていることからその片側のみに載荷すると考え、その中央になるように配置し、車輪位置での変位を写真-6 のようにレベルで測定した。

表-4 はその結果をとりまとめたものである。車両を載荷した側の変位は車輪の両端の平均で 1.0mm であったが、載荷しなかった側も 0.5mm とわずかに変位が生じた。主桁構造は幅員方向に独立しているが、荷重が床版を介して載荷していない側にも伝達されたことがうかがえる。

車両を載荷した側の主桁には積層桁が 8 組、積層していない桁が 7 本ある。ここで荷重を積層桁のみが均等に負担すると考えると変位の計算値は 1.6mm、すべての桁で負担すると考えると 1.2mm となる。表-3 によれば本橋の積層桁は接着が完全であると考えた場合の剛性よりも若干小さく、このことを踏まえれば変位は計算値よりも大きくなると考えられる。にもかかわらず実際の変位が計算値よりも小さいのは、載荷しなかった側的主桁にも荷重が伝達されたことに加え、主桁上に隙間なく敷き詰めた床版材も少なからず影響を与えているものと考えられる。

これらのことから、モデル橋に使用された積層桁は実橋レベルでも期待どおりの性能を有しているといえる。

5 結論

本論文では、地域の木材資源を地域で木橋として活用する方法として、スギ素材による積層桁を提案し、その性能を確認した上で実際に架設されたモデル橋の特徴と挙動について調べた。本論文における知見をまとめると以下のとおりとなる。

- 我が国と地域の森林資源の現状を示し、それらをふまえて、森林を守り育てていくための木材利用の方針を示した。また、森林土木分野の木材利用法の一手法として、素材をわずかな加工のみで木橋として利用する方法を示した。
- それらの考え方を踏まえて架設されたモデル橋の概要と特徴および用材の調達方法等における工夫の例を示した。
- モデル橋と同一工程で製作された積層桁の載荷試験により、それらの性能を確認した。またモデル木橋の載荷試験を行い、その挙動を確認した。

なお、モデル橋は京都府京丹後市内において 2006 年 5 月に供用が開始されており、林業用や工事用の大型車も含め適当な頻度で利用されている。また架設コストは約 138,000 円/m² と一般的な橋とほぼ同じであり、規模や用途を明確にすれば十分な機能を有する木橋が同等のコストで架設可能であることもわかった。

謝辞

本研究は京都府農林水産部、林業試験場、丹後広域振興局のご協力の下実施しました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 有馬 孝禮：木材の住科学 木造建築を考える，東京大学出版会，2003.
- 2) 例えば 中澤 隆雄，今井 富士夫，飯村 豊，瀬崎 満弘：かりこぼうず大橋の静的・動的力学特性，木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，Vol.3，pp.47-52，2004.
- 3) 石川 芳治：森が育て 森が育む木製ダム，土木学会誌 Vol.56，No.3，2001.
- 4) 佐々木 貴信，柴田 悟，原田 利正，小笠原 正太：木製治山ダムの施工と実験，第 53 回日本木材学会大会研究発表要旨集，PI-03，2003.
- 5) 農林統計協会：図説 森林・林業白書（平成 14 年度版），2003.
- 6) 日本林道協会：林道必携 技術編，2002.
- 7) 日本建築学会：木質構造設計基準・同解説，1995，2002.
- 8) 塚脇 健，土屋 幸敏，高奥 信也，小松 幸平，渡辺 浩：丸太素材を活用した道路橋の開発，木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，Vol.3，pp.147-154，2004.
- 9) 京都府丹後広域振興局：素材木橋による谷渡り工法 設計・施工マニュアル（案）維持管理マニュアル（案），2005.
- 10) 小野 広治，杉本 英明，久保 健，成瀬 達哉：スリット処理によるスギの柱材と梁材の乾燥割れと断面変形の抑制効果，奈良県森林技術センター研究報告，No.32，pp.103-108，2003.
- 11) 渡辺 浩，小松 幸平，高奥 信也，塚脇 健：丸太を用いた道路橋の可能性について，木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，Vol.2，pp.149-156，2003.
- 12) 渡辺 浩，小松 幸平，土屋 幸敏：接着剤と鋼棒により一体化された丸太積層桁の終局挙動について，第 54 回日本木材学会大会研究発表要旨集，p.214，2004.

（2006 年 9 月 11 日受付）