

プレストレス木床版橋のコスト評価と試設計

Cost evaluation and Trial design of Stress-Laminated Timber Deck Bridge

中嶋学夫^{*} ○今野 岳^{**} 堀江 保^{***}

NAKAJIMA Manabu , KONNO Takeru and HORIE Yasushi

^{*}(社)秋田県建設技術センター (〒010-0941 秋田市川尻町字大川反 170-177)

^{**}豊橋技術科学大学工学部 (〒441-8580 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1)

^{***}博士(工学) 秋田工業高等専門学校 (〒011-8511 秋田市飯島文京町 1-1)

ABSTRACT Recent concerns over the environment and resource conservation have instigated the attempt to choose wood as a material, in addition to steel and concrete, to construct a bridge. However, because of financial restrictions, "Expensive Timber Bridge" has not gained the taxpayer's understanding and not received a boost yet. This thesis is to evaluate the timber bridge in terms of trial design of the Stress-Laminated Timber Deck Bridge. The problems in the construction cost of the Stress-Laminated Timber Deck Bridge are shown, by comparing with PC (Pretension) Deck Bridge, most widespread as the road bridge. Consequentially, it is confirmed that the wood prices is a key factor to spread the timber bridge.

Keywords : プレストレス木床版、工事費、設計方法
stress-laminated timber deck, construction cost, design procedure

1.はじめに

環境意識の高まりと人工林の現況から、木材をカーボンニュートラルな資源として有効活用することに異論はない。しかし、木材を橋梁材料の選択肢とし、木橋の普及を図るには解決すべき課題が多いことも事実である。その一つが、木橋の建設費ではないだろうか。

一般に橋梁形式の選定には、供用性・施工性・耐久性(ライフサイクル)など

の性能を全て価格に換算し、経済的観点から橋梁形式を選定しているのが現実である。このため、木橋は多くの優れた特性を有するにもかかわらず(表-1)、広く普及するに至っていない。今までの木橋建設でも、木橋の持つ付加価値に着目し、純粋な価格競争で木橋が選定されている例は極めて少ないと思われる。また、従来の木橋研究においても木橋の経済性に焦点を絞ったものは少ないように感じる。以上のことから、木橋の問題点は、その経済性に集約できるとも言える。

賢明な研究者はすでに経済的な検討、または直感で木橋のコストに関する問題の解答を見い出しているかもしれない。しかし、本研究では木橋(プレストレス木床版橋)の経済性を愚直に評

表-1 木橋の特性

木橋のメリット	木橋のデメリット
<ul style="list-style-type: none"> ・景観性に優れる ・環境性能が高い ・死荷重が軽減できる ・軽量で耐震上有利 ・軽量で架設が容易 ・地場産業への貢献度大 ・耐塩害性大 ・走行騒音が低減できる 	<ul style="list-style-type: none"> ・耐久性(腐朽)に不安 ・一般的に高価

価することとした。

2. 検討する橋梁の規模と比較対象

木橋の研究では、その普及を目指すことが一つの目標である。したがって「最も普及している他形式の橋と木橋を競合させるべき」と考えた。公開されている橋梁統計としてアセットマネジメントに熱心に取り組んでいる自治体の例¹⁾では、橋長5～10mの橋梁数が最も多く、全体の6割がコンクリート橋である。秋田県の発注物件でも橋長10m程度のプレストレス床版橋がもっとも多く、他の自治体でも同じような傾向であろう。この規模のコンクリート橋では、プレテンション方式

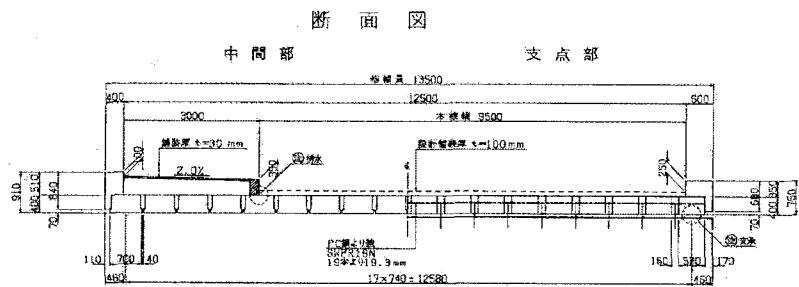
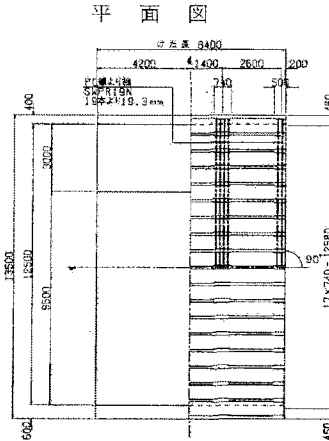


図-1 プレテンコンクリート床版橋

のスラブ橋桁 JIS A5373 が用いられ、設計には旧建設省標準設計²⁾を準用している。以上のことから、本稿で検討の比較対象とする競合橋を標準設計の中から、04-PRS-1208 (S8m-W9.5m-F3.0m-A90-GB)H07 とした。競合橋梁の平面図と断面図を図-1に示した。

この標準設計（プレテンション床版橋）に対する木橋として、近代木橋の中でもっとも機能が似通ったプレストレス木床版橋を選定した。主構造が桁と床の機能を有するプレストレス木床版が橋梁規模から有利と考えられる。加えて秋田高専環境都市工学科で長年プレストレス木床版を研究している³⁾ことから、その特性を把握していることも選定の理由である。

3. プレストレス木床版橋の試設計

競合するプレテン床版橋と同じ機能を有するプレストレス木床版橋を試設計した。以下にその計算過程を示す。

(1) 設計条件

秋田県内で生産可能なスギ構造集成材を想定した。諸元はプレテン床版橋と同一としている。(表-2)

(2) 許容応力度

構造用集成材の許容応力度は木歩道橋設計・施工に関する技術資料⁴⁾に示されている数値を用いた(表-3)。これをもとに設計用の許容応力度は使用条件等を勘案し、次のとおり定めた。算式は M.Ritter(USDA/Forest Service)"Timber Bridges"⁵⁾による。

表-2 試設計プレストレス木床版橋の諸元

構造形式	プレストレス木床版橋	
橋長	8.4m	
支間	8.0m	
全幅員	13.5m	
活荷重	B活荷重	
使用材	スギ構造用集成材(E65-F225)	
舗装厚	70mm	

許容曲げ応力度

$$F_b = F_b \cdot C_M \cdot C_{LS} = 6.512 \text{ N/mm}^2$$

F_b : 7.4 集成材の許容応力(N/mm²)

C_M : 0.8 湿潤調整係数

C_{LS} : 1.1 荷重分担係数

許容支圧応力度

$$F_{c \perp} = F_{c \perp} \cdot C_M = 1.6 \text{ N/mm}^2$$

$F_{c \perp}$: 2.0 集成材の許容応力(N/mm²)

設計ヤング係数

$$E' = E \cdot C_M = 5.12 \text{ kN/mm}^2$$

E : 6.4 集成材のヤング係数(kN/mm²)

表-3 集成材の許容応力度(N/mm²)

縦	圧縮	5.6
縦	引張	4.8
曲	げ	7.4
めり込み		2.0
せん断		0.9
曲げヤング係数		6,400

(3)設計結果

計算手法は前出の"Timber Bridges"⁵⁾に準拠した。秋田県で発注可能な橋梁として雪荷重を考慮している。

また、秋田県内の集成材工場を調査した結果、L=8.4mの

集成材を製造することが十分可能であった。このため、バットジョイント係数は1.0としている。応力・たわみ照査の結果を表-4に、試設計により決定した構造図を図-2に示した。

表-4 応力・たわみ照査

活荷重たわみ	曲げ応力度
1.36(1.6)cm	6.4(6.512)N/mm ²

()内が許容値

4.プレストレス木床版橋の積算

以上の試設計結果をもとにプレストレス木床版橋の積算を行った。積算は実際に県工事の発注・予定価格の算出に使用している自治体版新土木工事積算システム⁶⁾を用いた。単価の一部は概算であるが、実務に用いるシステムと積算基準を準用することで「発注可能な積算」を目指した。

(1)設計単価

プレストレス木床版橋の工事費を構成する費目のうち、木床版の材料費が最も大きな割合を占める費目である。木橋に使用されるような集成材の材料費として公表されているものではなく、集成材価格は見積になる。特注品、普及規格品を含め、集成材価格を調査したが、これといった決め手になる単価を見つけることはできなかった。過去の文献⁷⁾では、プレストレス木床版橋

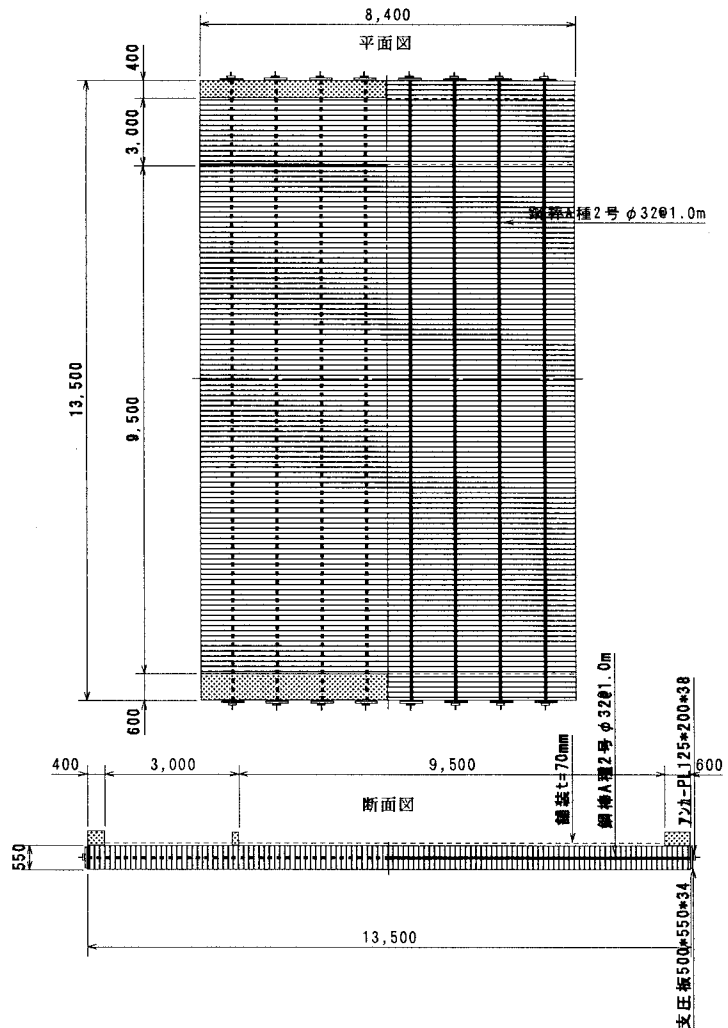


図-2 プレストレス木床版橋

を提案するにあたって集成材単価を次のように想定している。

- 集成材（規格品） 190,000 円/m³
- 特注集成材 240,000 円/m³

表-5 集成材の採用単価

これらの単価を参考に県内集成材工場を視察調査したところ、次のような所見が得られ、結果、今回の積算では表-5の設計単価を採用するに至った。

名称	仕様	単価（円/m ³ ）
規格集成材	高 ≤ 450mm	190,000
特注集成材	高 > 450mm	240,000
防腐処理	再乾燥に+10,000円/m ³	60,000

- 建築用集成材が ≒ 120,000 円/m³ である。
- 梁高 450mm 以上は特注品の生産工程と同様。
- 県内工場数はまだ価格競争するに至っていない。
- PS 鋼材、地覆高欄のため工場加工手間が必要。

防腐防蟻処理費の相場は、ナフテン酸亜鉛でも AAC でも 30,000 円代/m³ が多い。しかし、橋梁部材のような寸法になると処理方法や工場に限られる。このため、聴き取った高めの単価を想定した。また、外材や他県の価格を検討対象にすることも考えたが、木材の優れた環境性能を生かすため、地場材料を利用することがより好ましいと考えた。

集成材以外の材料費は、秋田県の積算資材単価（実施単価と呼んでいる）および財団法人建設物価調査会発行の「建設物価」等によった。

表-6 プレストレス木床版橋の工事費構成

(2)積算基準

プレストレス木床版橋の工事費を構成する主たる費目は表-6のとおりである。

このなかで「②架設工」は見積によらず、プレテン桁の架設歩掛を準用した。プレストレス木床版は、分割・一体化横締が比較的容易なので、積算上有利な質量に木床版を分割し、架設するものとした。その分割質量に最も近いプレテン桁の架設歩掛を準用している。作業の実態もプレテン PC 床版橋とプレストレス木床版橋では極めて似ている。

名称	摘要
①木床版輸送製作費	集成材材料費とその運搬費用
②架設工	プレテン桁の架設に準じる
③横組工	鋼棒緊張他
④橋梁付属工	伸縮装置、地覆高欄
⑤橋面舗装	防水工を含む
⑥間接工事費・税	共通仮設、現場管理費他

「③横組」では、プレストレス木床版に間詰のコンクリート等は不要となるが、PC 鋼材の緊張作業はコンクリート橋と同じような作業が必要である。

なお、木橋用の地覆・高欄・支承は、コンクリート橋のそれとは異なるものとなるだろう。しかし、今回はコンクリート橋と同等の価格で実現できるものとした。舗装・防水工も t=70mm でコンクリート橋と同等のものとした。ただし、伸縮装置は木橋に不要と考えられたので、胸壁と床版の間に瀝青質目地を挟むことで済ませている。

(3)積算結果

図-1と図-2に示した同一機能を有するプレテン床版橋とプレストレス木床版橋の工事費を比較すると以下の結果となった。結果的に木床版では2倍強の工事費（消費税含む）となった。

- プレテン床版橋 13,821 千円（122 千円/m²）
- プレストレス木床版橋 32,914 千円（290 千円/m²）

工事区分	工種	単位	数量	単価	金額
0001	プレストレストレス木床版製作	式	1		21,782,985
0002	工機搬送費	式	1		295,000
0003	制送工	式	1		285,000
0004	制送(木床版)	式	1		295,000
0005	PC構工	式	1		26,593,207
0006	プレストレストレス木床版製作	式	1		18,720,000
0007	プレストレストレス木床版製作	m ³	62.4	300,000	18,720,000
0008	支承工	式	1		449,532
0009	工機搬送	個	2	224,758	449,532
0010	架設工(スレ)	式	1		141,610
0011	新架設 木床版架設	本	7	20,230	141,610
0012	架設工(横組)	式	1		1,282,005
0013	PC架設工	本	9	26,593	239,284

図-3 プレストレス木床版橋の設計書イメージ

工事価格（消費税抜き）の価格構成を見たものが表-7,8および図-4,5である。このことから、上部工工事費のうち、床版の輸送材料費（特に材料費）が最も大きな価格要因であることが明確になった。

表-7 木床版橋価格構成

費目	金額(千円)	
輸送製作	18,955	直接費 22,167 千円 70.7%
支承	450	
架設	142	
横組	1,282	
付属物	905	
舗装	433	
間接費	9,180	
工事価格	31,347	

表-8 プレテン床版橋価格構成

費目	金額(千円)	
輸送製作	4,032	直接費 8,417 千円 63.9%
支承	581	
架設	303	
横組	612	
付属物	2,456	
舗装	433	
間接費	4,746	
工事価格	13,163	

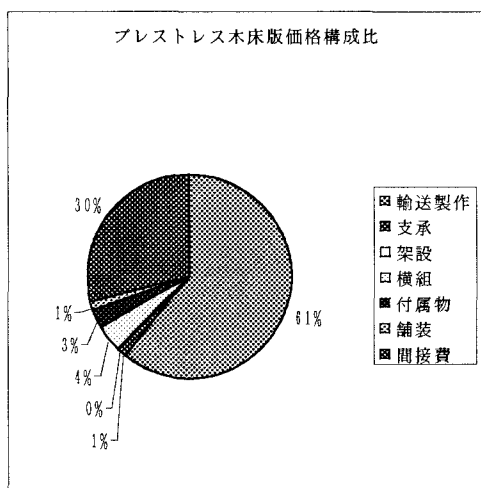


図-4 プレストレス木床版橋の価格構成比

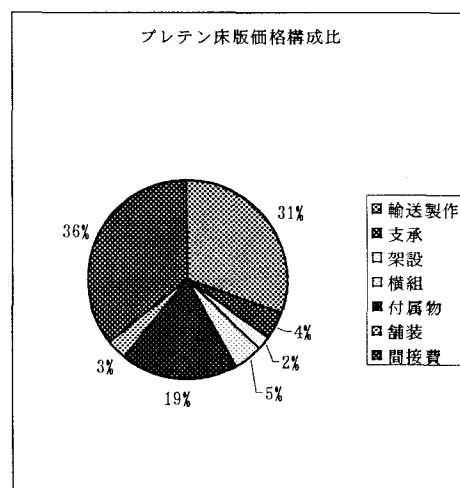


図-5 プレテン床版橋の価格構成比

したがって、プレストレス木床版橋上部工の価格低減を図るには、木材材料費の低減が肝要となる。今回の試設計のように橋長に比較し、幅員が広い橋梁では、有効幅が小さくなり設計上不利であった。このため、車道部と歩道部を分離して試算したところ、下記のように 13.2% 工事費を低減することができた。しかしながら、競合するプレテン床版橋との差は依然として大きい。

○歩車道分離プレストレス木床版橋 28,560 千円 (252 千円/m²)

5. 他のコスト要因の考察

表-1に示した多くの木橋のメリット、特に「軽量であること」、「環境性能」に注目すれば、木橋のコストとして上部工ばかりで経済性を判定するわけにいかない。下部工やライフサイクルコストまで検討することが必要である。ただし、ライフサイクルコストの検討では文献 8)で研究されているとおり、橋の寿命の設定で結果が異なる。木橋のライフサイクルコストが他の橋梁に比べて圧倒的に不利ではないが、今後の研究に待つ部分も多い。本論文では下部工のコストと温暖化ガスの排出量に着目して考察した。

(1) 下部工のコスト考察

下部工には種々の基礎形式・地質条件が絡み、そのコスト算定は非常に複雑である。しかし、秋田県の地質条件では直接基礎形式の橋台は極めて少なく、また様々な地質条件を簡略化して考える必要があるため、比較的浅い鋼管杭の鉛直支持に限定して下部工コストを考察してみる。(経験上、浅い杭基礎では鉛直荷重で杭本数が決まってしまうケースが多い。)

試設計した上部工規模を対象とする橋台寸法を「常識的」に考えると図-6のような寸法を例示できる。実際には胸壁や翼壁が必要になるが簡略化している。この橋台の杭基礎が支える鉛直荷重の集計、鋼管杭基礎の本数を表-9にまとめた。

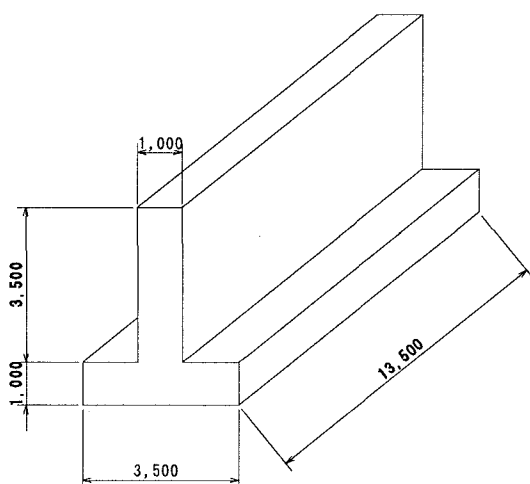


図-6 橋台の例示

表-9 下部工の経済比較

名称	単位	① プレストレス木床版橋	② プレテン床版橋
鉛直荷重の合計	t	323	385
上部死荷重	t	25	87
上部活荷重	t	62	62
橋台躯体	t	236	236
鋼管杭D500×9mm	本	6	7
地盤N=30の杭1本当支持力	kN	588	588
概略の橋台工事費	円/基	¥15,948,450	¥16,248,750

表-9では、平均 N 値 30 程度の砂礫及び砂層支持地盤と仮定し、道路橋示方書⁹⁾から鋼管杭の許容支持力を求めている。試算結果、プレストレス木床版橋の下部工では鋼管杭を 1 本削減できる。しかしながら、橋台 1 基の工事費削減幅は、1.8% にすぎず、優位な差ではない。PHC 杭で試算しても同等の結果であった。したがって普及橋梁規模では、木橋の軽さが下部工に与えるメリットは極めて少ない。もし、上部工規模が大きくなり、プレテン床版橋標準設計で L=21m 程度なら橋台反力が橋台の躯体質量を上回る。この程度の規模であれば、死荷重の軽減が下部工のコストに影響を与えることが予想される。

表-10 橋梁比較設計例

コンクリートの橋梁を木橋に置き換えることを想定すると、その上部死荷重の軽減効果は、コンクリート橋と鋼橋の死荷重の差に近いと思われる。補足としてスパンの短い橋梁の比較設計例を表-10に示した。この表からもスパンの短い橋梁の上部死荷重軽減効果は、下部工にそれほど影響しないことが解る。

H川橋梁・形式比較検討

ケース	①	②
構造形式	7°レソPC単純床版橋	単純合成桁H桁橋
支間(m)	13.44	13.3
幅員(m)	15.878	15.878
橋面積(m ²)	222.3	222.3
上部工工事費	¥32,788,000	¥38,274,000
¥/m ²	¥147,494	¥172,173
下部工工事費	¥74,500,000	¥73,459,000
工事費計	¥107,288,000	¥111,733,000

G橋梁・形式比較検討

ケース	①	②
構造形式	7°レソ2径間連結PC床版橋	2径間連続鋼床版桁橋
支間(m)	2×15.1	2×15.5
幅員(m)	9.0	9.0
橋面積(m ²)	285.3	285.3
上部工工事費	¥45,027,000	¥66,569,000
¥/m ²	¥157,823	¥233,330
下部工工事費	¥100,024,000	¥98,927,000
工事費計	¥145,051,000	¥165,496,000

(2)CO₂排出量の考察

木橋が他の材料を用いた橋梁に比較し、環境面とくに温暖化ガス排出面で有利であることはいうまでもない。しかし、この特性もコストに換算されなければ、木橋の選択に結びつかない。木材の炭素排出量の観点からコスト削減への転化が可能か検討してみた。

表-11に炭素税が導入された場合の試算結果を示した。表中のCO₂排出原単位は、土木学会LCA小委員会¹⁰⁾の算出した数値である。また、木材は炭素固定効果を考慮するとCO₂排出量がマイナスになるので、その場合の試算も表に示した。なお、プレストレス木床版は62.4m³の杉材に比重0.5をかけて材の質量とした。プレテン床版のコンクリート体積は、BS-08桁(5.3t)×18本の質量から換算したコンクリート体積に横組コンクリート5.6m³を加算している。

炭素税は環境・持続社会研究センター(NGO)が試算する炭素税6,000円/ton-cから6円/kg-cとした。参考まで北欧のフィンランド、デンマークで化石燃料に課す炭素税は6,500～7,000円/ton-cである。環境省の企業アンケートでは1,000円/ton-c程度の炭素税を支持する企業が多い。

残念ながら、表-11のとおり、考えられる炭素税程度では、木橋の環境への貢献が経済的に優位とはいえない。

表-11 炭素税試算

上部工形式	プレストレス木床版橋				7°レソ床版橋
	製品原単位で計算		炭素固定を考慮したとき		
寸法	L8.4m×W13.5m				L8.4m×W13.5m
主材料	木材(杉)				生コン
(1)主材料数量	31,200	kg	31,200	kg	43.76 m ³
(2)CO ₂ 排出原単位	0.0297	kg-c/kg	-0.492	kg-c/kg	84.9 kg-c/m ³
(3)材料の排出炭素(1)×(2)	927	kg-c	-15350	kg-c	3715 kg-c
炭素税(3)×6円	5,560	円	-92,102	円	22,291 円

6.まとめ

本研究の結果から、道路橋として普及規模の木橋を計画する場合、第一のハードルとして上部工の初期コストを問題にせざるを得ないことが解った。競合するプレテンスラブ橋並みの木橋上部工を実現するには次のような課題が考えられる。

- より安価(防護処理を含む)な木材はないか?
- 木材使用量を大幅に減量する方法はないか?
- 木橋に最適な規模、構造を見出せないか?

今後、許容される品質で安価な木材の選択を検討することが重要である。また、今回はプレストレス木床版橋を想定したが、他の構造形式の木橋についても検討する余地がある。しかし、木橋の本格的な普及を目指すには、「単純な価格」以外の価値観が必要かもしれない。

7. おわりに

「二酸化炭素などの温室効果ガスを減らすため、あなたはエネルギーを節約する生活をしてもいいと思いますか」の問いに86%が「節約してもよい」と回答。

04年11月の朝日新聞社世論調査

環境意識の高まりから、社会の価値観の変化は案外近いかもしれない。血税で「少々高価な木橋」を架けることへの理解が得られるよう、木橋のコスト研究の継続が必要とされる。

参考文献

- 1) 横浜市道路局：横浜市橋梁長期保全更新計画 検討報告書 平成16年3月
http://www.city.yokohama.jp/me/douro/download/bessi_2.pdf
- 2) 社団法人 全日本建設技術協会：建設省制定土木構造物標準設計18（プレテンション方式PC単純床版橋）
- 3) 秋田高専 堀江保 米谷裕 秋田県立大 佐々木貴信：第2回木橋技術に関するシンポジウム結果報告(18)プレストレス木床版の緊張力変化に及ぼす種々の影響
- 4) 社団法人 国土技術研究センター：木歩道橋設計・施工に関する技術資料 平成15年10月
- 5) Michael A Ritter：Timber Bridges Design, Construction, Inspection, and Maintenance (Structural Engineer United States Department of Agriculture Forest Service)
- 6) 社団法人 日本建設情報総合センター(JACIC)：自治体向け国土交通省版積算基準データ・自治体版新土木工事積算システム
<http://www.sekisan.jacic.or.jp/jinfo/index.html>
- 7) 低コスト木橋検討委員会：「木橋を作ろう」森の贈り物・木の橋—木橋作りの道しるべ—平成11年8月
- 8) 熊本県 上月裕 熊本大 渡辺浩 九州東海大 加藤雅史：第3回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集(3)木歩道橋の試設計とコスト評価の一例
- 9) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編IV下部構造編 平成14年3月
- 10) 井村秀文：建設のLCA オーム社