

木歩道橋のコスト評価と環境負荷に対する検討

A study on cost evaluation and environmental burdens for pedestrian timber bridges

上月裕* 渡辺浩** 山尾敏孝***

Kouzuki Yutaka, Watanebe Hiroshi and Yamao Toshitaka

*工修 熊本県庁参事, 阿蘇地域振興局 (〒862-8570 熊本県阿蘇郡一ノ宮町宮地 2402)

**博 (工) 熊本大学助手 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

***工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

Trial designs of the small-scale pedestrian timber bridges which have occupied the large proportion of the whole timber bridges were carried out. The cost evaluation and the investigation of environmental burdens were calculated based on the trial designs. In the cost evaluation, the comparisons of the construction cost and the total cost between the timber bridges and the concrete bridges were compared by the cost simulations. In the investigation of the environmental burdens, the consumption energy and the amount of carbon discharge were calculated and for each span length of the bridges. The result indicated that for small-scale pedestrian bridges, the timber bridges give the advantage in total cost and environmental burdens over the bridges constructed by concrete.

Key Words: pedestrian timber bridge, cost evaluation, environmental burdens

キーワード: 木歩道橋、コスト評価、環境負荷

1. はじめに

かつて橋といえば、木橋という時代があった。古来より豊かな木材資源を有する我が国では、入手が容易で適度な強度を有する木材が活用されたことは、ごく自然な選択であった。しかしながら、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尺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定した供給という理由により、主役の座が木橋から鋼橋やコンクリート橋へと交代するに至った。このようななか約 15 年前から再び木橋が架けられるようになり、近年は支間 40m を越える規模の車道木橋も施工されるようになった。写真-1 は 2003 年春に宮崎県に竣工した全長 140m、最大支間 48.5m の日本一の車道木橋「かりこぼうず大橋」^{1)~3)}である。一方、数の面でも大小併せて現在 1000 橋を超える木橋が我が国にはあると言われている。

このように木橋が復興したのは主に以下の3つの理由が挙げられる。1つめの理由は 20 世紀型の大量消費型社会から低環境負荷型社会へ転換するために環境負荷の小さい木材資源の活用を図るという環境の視点である。2つめは集成材技術の発展や防腐技術の進歩により、大断面部材の製造や構造材の耐久性の向上が期待できるようになったという木材加工技術革新の視点である。そして3つめは

アメニティの視点である。近年は公共構造物にも景観やデザイン、アメニティ等が求められるようになり、天然素材を用いた木橋はこの観点からも注目されている。

このような背景を受け大規模な木橋ばかりでなく、環境やアメニティが重視される公園等の身近な場所においても木歩道橋が多く架設されるようになってきた。このような木橋は現在の木橋の多数を占めており、今後もますます増加するものと考えられる。しかしながら、実務者レベルにおいては木橋の採用を躊躇する声が少なくないのも事実である。そして、それらは初期コストの高さと耐久性に関する疑問に集約される。初期コストの高さの原因として、木橋はアメニティ、ランドマーク、シンボル等の様々な付加価値の付与された特別な橋として建設される例が多く、また黎明期にあることから試行錯誤的な取り組みがなされてきたことが考えられる。また、耐久性に関しても比較的に歴史が新しいため維持管理に関する事例が少なく、このことが耐用年数に関する不安を増長させているとも考えられる。このように現在、木橋においては明確な根拠が無いままにコストや耐久性についてのイメージが一人歩きしている状況にあるといえる。

一方、環境の世紀と言われる今日、コストの評価だけではなく、環境負荷の視点からの検討も重要になってきている。これまでに土木構造物において鋼橋やコンクリート橋

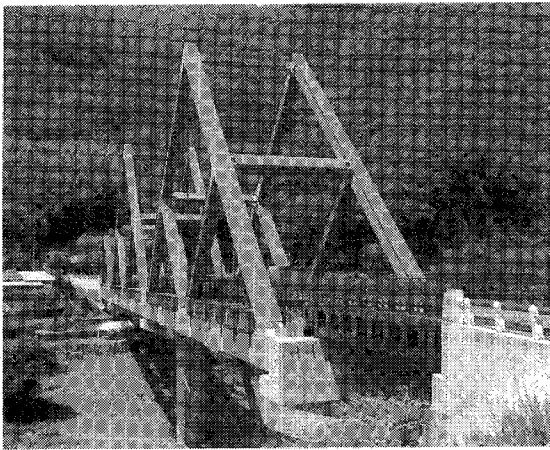


写真-1 かりこぼうず大橋

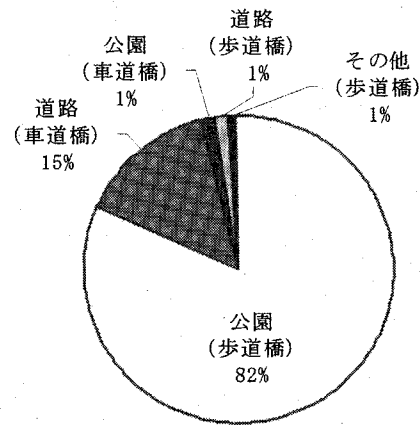


図-1 木橋の設置箇所と用途 (熊本県)

表-1 公園構造物の耐用年数¹²⁾

	木製	その他 (コンクリート等)
パーゴラ	10 年	20 年
ベンチ	7 年	7~20 年
木製遊具	10 年	—
便所	15 年	20 年
案内板	7 年	10 年

表-2 減価償却から見た耐用年数¹³⁾

資 産 名	耐用年数
木 橋	15 年
コンクリート製栈橋	30 年

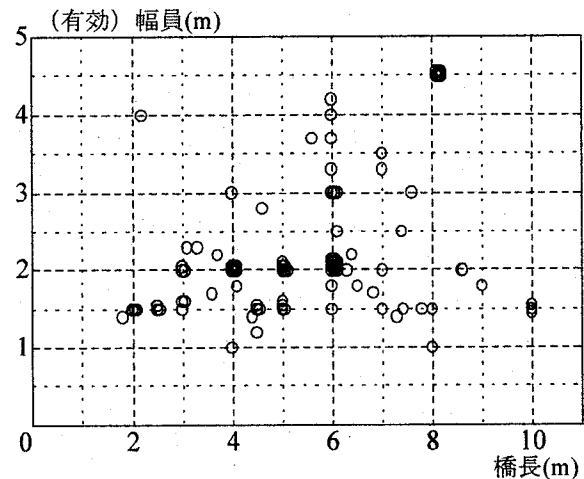


図-2 公園の歩道木橋の径間長と幅員

の評価環境負荷とコストに関して行われた代表的な研究例としては、伊藤らの研究^{9)~7)}が挙げられる。木構造の研究例としては、Buchananが発表した材料の製造に係るエネルギー量から、材料生産のために大気中に放出される炭素量を算出したデータ⁸⁾をもとに材料の環境負荷を評価した大熊らの研究^{9) 10)}があるが、木橋において環境負荷の評価がなされた例は少ない。

そこで本研究では、現在、木橋の中で多くの割合を占める小規模な歩道橋を例に木橋の試設計を行い、目標耐用年数とそれに基づいた維持管理計画と費用を定義して評価のケーススタディを行うとともに、大熊らの研究^{9) 10)}を参考に消費エネルギーと炭素放出量を算定した。ここでは、これらの検討結果及び、これをもとに架設された木橋のコスト比較の事例について示す。

2. モデル橋の設定

モデル橋の条件設定にあたっては、よくみられるスペックであること、適切な機能とアメニティを兼ね備えたものとする等々の汎用性を考慮し、以下のような方針を定義した。

① 架設地点は公園の園路の小規模な歩道橋とする。

形式は単純桁橋で高欄は設けない。橋長は 2m、5m、8m とする。図-1、図-2 は、平成 13 年に熊本県における木橋の設置箇所と用途、規模をまとめたものである。県内の大多数の木橋が 2m~8m の公園にかかる単純桁橋であることがわかる。これらの木橋は桁下の高低差が小さく、転落防止を考慮する必要がない場合が多いことから高欄は設けず地覆のみとする。また、車イスがすれ違える幅員を考慮して有効幅員を 1.8m とする¹¹⁾。

② 目標耐用年数 15 年タイプと 30 年タイプを想定する。

表-1、表-2 により、風雨に曝される公園等の木構造物では、耐久性は最大でも 10 年程度であり、原価償却からの観点からも 15 年での更新が妥当であるとされていることがわかる。このことから、標準的な仕様の木橋の耐用年数を 15 年と想定する。また、様々な工夫により耐用年数 30 年程度とした高耐久仕様についても検討する。以下、標準的な仕様の木橋を 15 年タイプ、高耐久仕様の木橋を 30 年タイプと呼ぶ。

③ 使用樹種はスギとする。

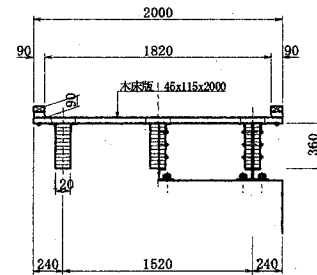
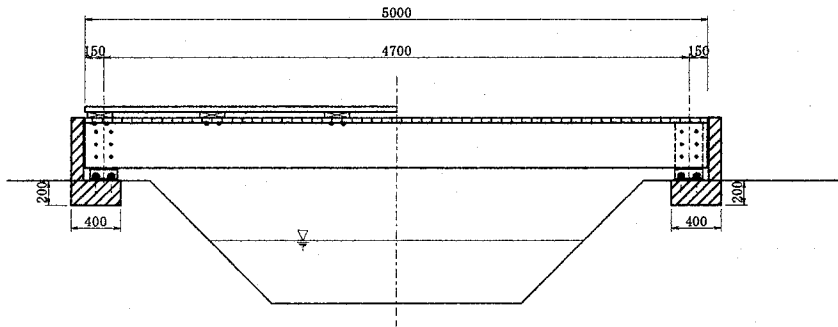
スギは国内の広範囲で豊富に蓄積されており将来的にも供給不安がないこと、また安価なうえ適度な性能と耐久性を有していることから、樹種を国産スギとする。ただし、寸法や強度性能は一般に入手できるものとする。

表-3 両タイプにおける主要な違い

	30年タイプ	15年タイプ
目標耐用年数	30年	15年
主桁材料	集成材	製材
主桁数	3主桁 (8mでは4主桁)	5主桁
主桁と床板の固定方法	床面下面から固定	床面上面から固定

側面図

標準断面図



平面図

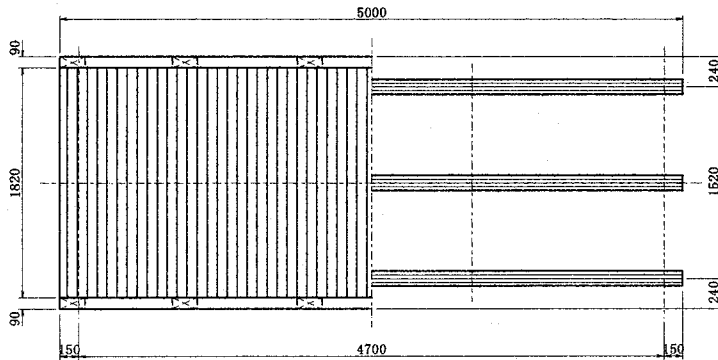


図-3 試設計例 一般図 (30年タイプ 橋長5m)

④ 荷重他の設計条件は指針等^{14)~17)}に準じる。

設計条件については広く採用され得るものとするため、一般の橋と同等の性能を備えるものとする。

これらの設計条件に基づいてモデル橋の試設計を行う。表-3は両タイプにおける主要な違いをまとめたものである。一方、木橋のコストのレベルが相対的にどの程度なのかを知るため、比較対象として同様のスペックを有する一般的な橋の試設計も行う。この規模ではプレキャストコンクリート製品を用いた簡易な形式の橋が一般的である。ここでは2mと5mではPC版を、また8mではプレテン形式スラブ桁を使用することとする。ただし、PC版を用いた2mと5mでは製品規格の関係から有効幅員が2.2mとなっている。以下、この形式の橋を一般橋と呼ぶ。

下部工については、公園内の小規模歩道橋において重力式橋台を設計すると、一般に下部工が巨大化し不経済となる。そこで、簡易的な下部工として枕式橋台とする。底版は設置箇所の極限支持力を 200kN/m^2 程度と仮定し、安定計算により形状を決定する。また、桁かかり長は道路橋示

方書・耐震設計編によれば70数cmを確保する必要があるが、同様の理由で30cm程度とする。木橋の一般図の例を図-3に、これらの試設計の結果を表-4に示す。

3. 評価

本研究では、あらかじめ定義された耐用年数にふさわしい橋の形式を検討するため、その耐用年数にあった設計・施工、点検・維持管理を行うことをコンセプトとして評価を行った。

3.1 初期コスト

まず初期コストについて検討する。初期コストは実勢価格を考慮し、直接工事費に70%相当の間接工事費を含めた価格とした。直接工事費の材料費については市場単価^{18),19)}に材料実数を乗じることで価格を算定した。また、運搬・施工費等については、施工単価^{20)~22)}に材料実数を乗じることで価格を算定した。

表-4 モデル橋の設計諸元

種類	橋長 (m)	上部工						下部工	
		主桁			床版		総重量 (kgf)	寸法	容積 (m ³)
		幅 (mm)	高さ (mm)	主桁数	幅 (mm)	高さ (mm)		底板寸法 (m)	
30年タイプ	2	120	180	3	80	40	225	0.4×0.2×2.6	0.24
	5	120	360	3	115	45	831	0.4×0.2×2.6	0.24
	8	150	480	4	115	45	1,776	0.7×0.3×2.6	0.60
15年タイプ	2	90	90	5	100	30	139	0.4×0.2×2.6	0.24
	5	150	210	5	80	40	634	0.4×0.2×2.6	0.24
	8	210	300	5	80	40	1,570	0.7×0.3×2.6	0.60
一般橋	2	PC版		有効幅員 2,200mm	床版厚 50 mm		1,379	0.4×0.2×3.0	0.27
	5	PC版		有効幅員 2,200mm	床版厚 100 mm		5,296	0.7×0.4×3.0	0.87
	8	プレテン方式スラブ		有効幅員 1,800mm	床版厚 400 mm		23,102	1.6×0.7×3.0	3.02

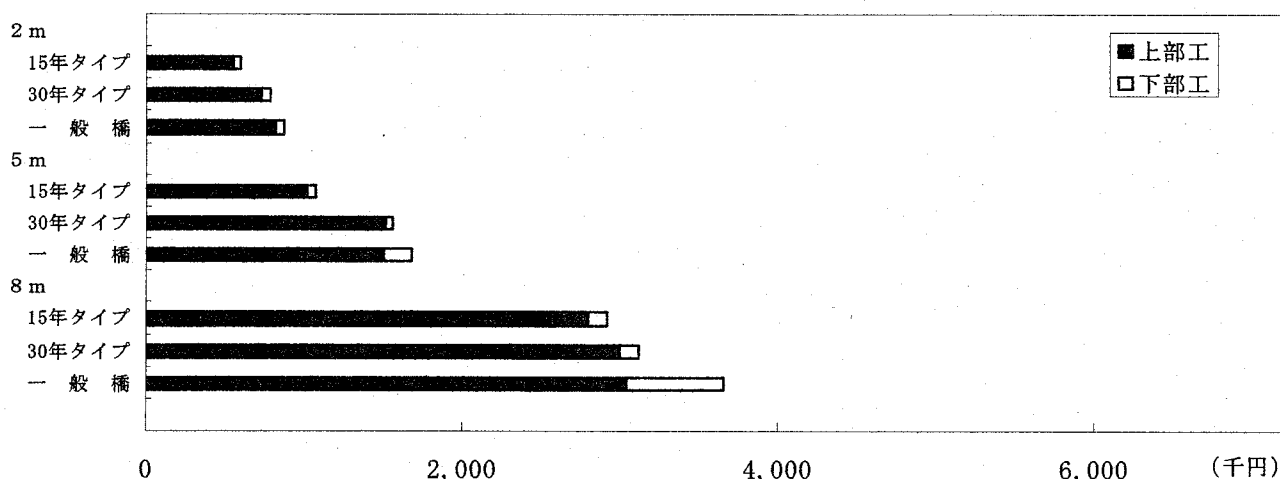


図-4 初期コストの比較

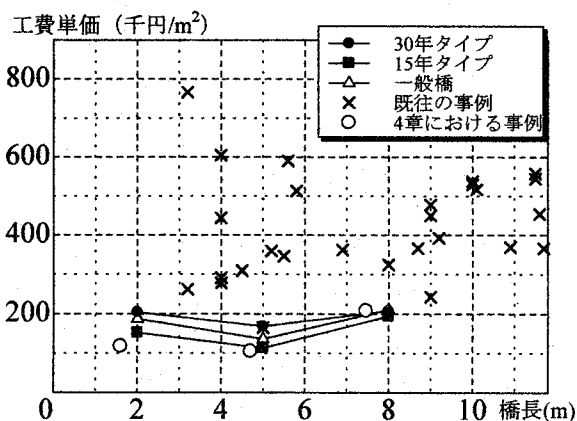


図-5 上部工の単価と事例との比較

図-4は工費と橋長の関係を図示したものである。まず、上部工費であるが、木橋の上部工費はいずれの橋長においても一般橋以下、あるいは同等であることがわかる。15年タイプが最も安価であるが、橋長が長くなると優位性が減少しているのは主桁用の製材が断面も大きく、長くなるため高価になることによる。一方で30年タイプが15年タイプよりも高価なのは、床板の耐久性を向上させるために床板下面から主桁と床板を固定する補助金物の使用量が

多くなり、その加工費が増加するためである。また、下部工費については木橋は軽量であるため、工費が占める割合は小さい。これに対して一般橋は重量が大きい、特に橋長が大きくなると相対的に費用も大きくなる。総工費についても、各モデル橋の価格は下部工費の占める割合があまり大きくないため、一般橋の橋長8mを除いて上部工費と大きく変わらない。

図-5は、上部工費をm²あたりの単価で整理し、橋長との関係を示したものである。この図より木橋の単価は10～20万円/m²程度であり、価格競争力の面でも十分な魅力を持っていることがわかる。図中には既存の木橋の事例もプロットされているが、ほとんどの事例がここで示した試設計例よりも高価であることもわかる。試設計例では高欄が設けられていない等の諸条件の違いはあるが、橋長がコストに比例しないことから、構造以外の要素、すなわちデザイン的な付加価値分がかなりの部分を占めていると考えられる。また、図-5には次章で後述する15年タイプをベースとして施工した3橋の事例もプロットされている。この結果からも本検討は実践的にも十分なものであることがわかる。

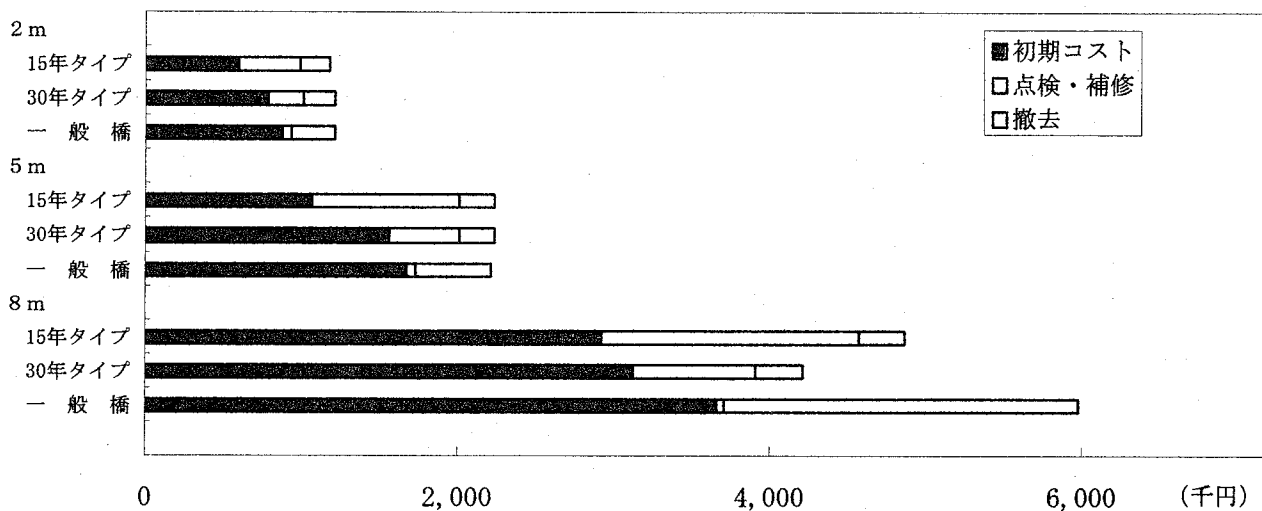


図-6 目標供用期間15年の場合のコスト比較

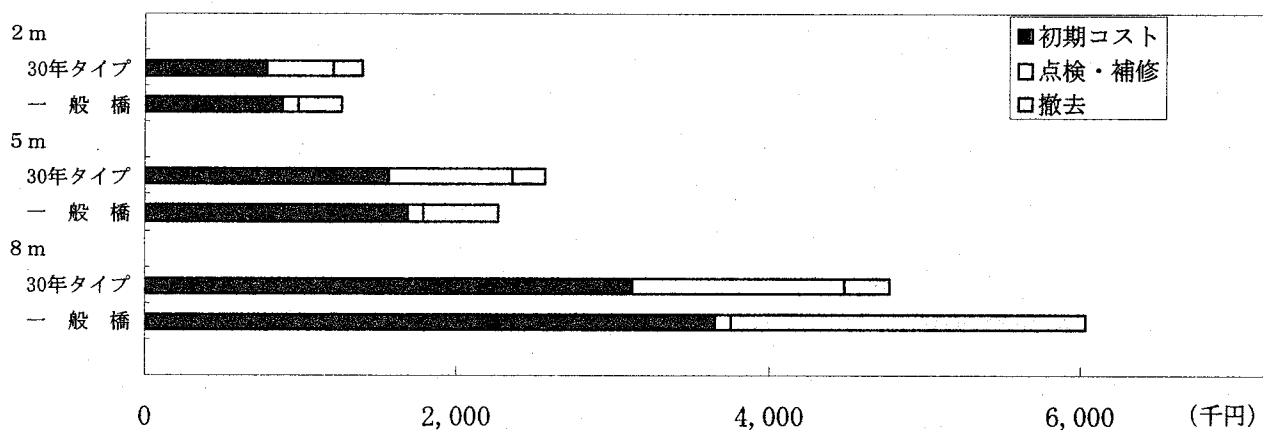


図-7 目標供用期間30年の場合のコスト比較

表-5 点検・補修の実施頻度

種類	点検	塗装	床版取替
30年タイプ	当初1年後、以後3年毎	当初1年後、以後6年毎	—
15年タイプ	当初1年後、以後3年毎	当初1年後、以後3年毎	8年後に1回
一般橋	10年毎	—	—

3.2 ライフサイクルコスト

以上の検討により木橋の初期コストは一般的に見ても高価ではないことが示された。しかしながら木橋は維持管理に要する費用や労力が大きく、それらを考慮すると結局は高価なのではないかという疑問も生じる。そこで、供用期間に必要となると考えられる点検・維持管理・補修に要するコストを含めたライフサイクルコストの観点から、中長期的な木橋のコスト競争力について検討した。

表-5は目標供用期間中に想定される維持管理と補修の内容と実施頻度を示したものである。15年タイプは部材の

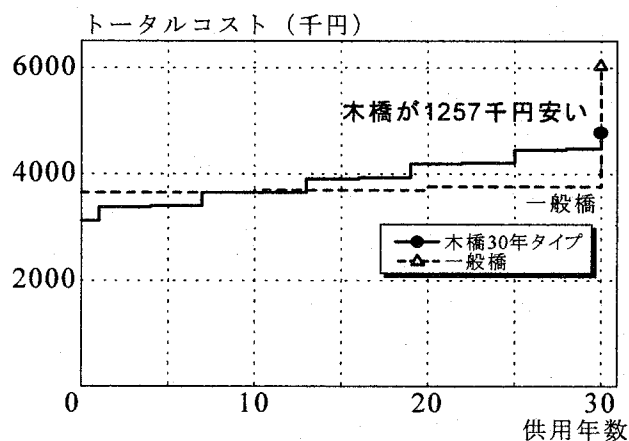


図-8 トータルコストの推移の例

橋長8m 目標耐用年数30年の場合

腐朽を考慮し、30年タイプと比べ短期間で点検・補修を行うことを想定している。この前提にもとづきトータルコストを求めたのが図-6、図-7である。また、図-8は供用年数におけるトータルコストの推移の例である。ただし、いずれのタイプにおいても目標供用期間が経過した時点

表-6 各材料の製造時における消費エネルギーと炭素放出量¹⁰⁾

	製造時消費エネルギー (MJ/ton)	製造時炭素放出量 (Kg-C/ton)	炭素固定量 (Kg-C/ton)
製 材	6,420	210	500
集 成 材	12,580	283	500
コンクリート	2,000	50	—

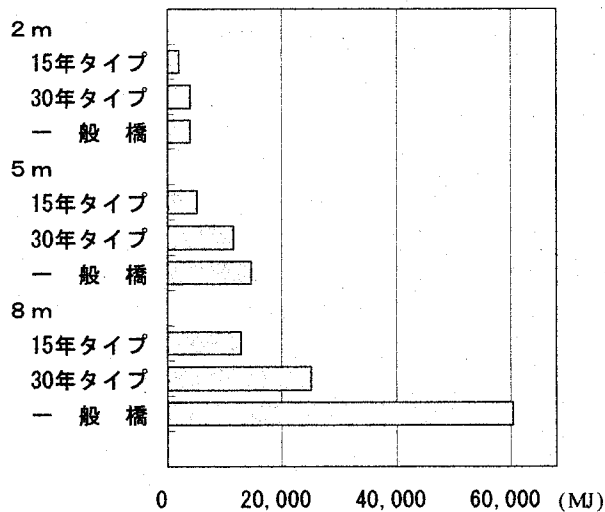


図-9 製造時消費エネルギーの比較

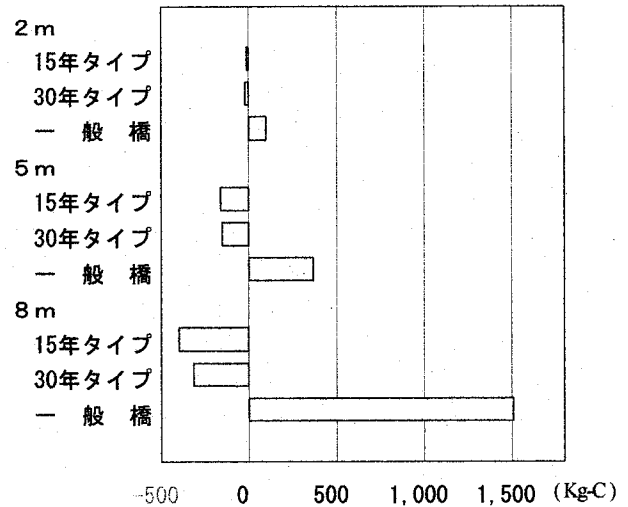


図-10 製造時炭素放出量の比較

で撤去するものとする。なお、点検・補修及び処分費についても、初期コストと同様に実勢価格を考慮し、直接工事費に70%相当の間接工事費を含めた価格とした。点検費については実績を踏まえ点検に必要な人員数に労務費²⁰⁾を乗じた額とした。また、補修費及び処分費については実数量に施工単価^{20)・22)}、市場単価^{18)・19)}を乗じて算定した。

これらの図より15年タイプ、30年タイプ共に初期コストは一般橋と比較して小さいが、維持管理费用を加えていくとその差は小さくなるのがわかる。また、橋長2m、5mの場合においてライフサイクルコストは、目標供用期間15年の場合、3橋ともほぼ同等であり、目標供用期間30年の場合、30年タイプは一般橋より大きくなるがその割合は約10%と小さい。8mの場合においては、初期コスト、維持管理費、撤去費のトータルバランスの良い30年タイプが最も有利となり、重量のある一般橋が最も不利となるのがわかる。

3.3 消費エネルギーと炭素放出量の評価

近年のインフラ整備では単なるコストミニマムだけではなく、その環境負荷を小さくするような配慮がなされるようになってきている。このことから、ここでは木材およびコンクリートの製造時における消費エネルギーと炭素放出量を示す表-6をもとに、環境負荷についての検討を行う。表-6の消費エネルギーは材料を製造する時に生じる直接エネルギーのみを化石燃料の消費エネルギーに換算したものであり、木材については乾燥等の製材までの一

連の作業エネルギーを含む。なお、集成材には接着剤が用いられるが、これらの製造時の環境負荷は極めて小さい。図-9に、各モデルの製造時における消費エネルギーを示す。15年タイプと30年タイプを比較すると、製材を使用する15年タイプは主桁に集成材を使用する30年タイプよりも消費エネルギーは小さくなるのがわかる。また、一般橋は木橋と比較して消費エネルギー量が大きいが、橋長が大きくなるにつれてその傾向は著しくなる。

図-10は、各モデルの炭素排出量を示している。ここで、木材はそれ自身が炭素を表-6のように貯蔵できるので、結果として木材の炭素放出量はマイナスになるのがわかる。一方、一般橋ではこのような効果はなく、結果として炭素は放出されるのみとなる。これらのことから、エネルギー消費、炭素放出の両面において、木橋は一般橋と比べて環境負荷は小さく環境にやさしいといえる。

4. 実橋によるコスト比較

熊本県では、以上のコンセプトに基づいた木橋が3橋架設されている。ここではこれらの実橋をモデルにコストの比較を試みた。これらの橋は15年タイプをベースに設計されており、地産地消のコンセプトのもと、地元のスギを用い、地元の技術力で架設されている。施工木橋の一般図の例を図-11に、各橋の諸元を表-7に示す。ここでは、これらの橋をA橋、B橋、C橋と呼ぶ。

表-7 施工事例の諸元

	橋長 (m)	幅員 (m)	主桁			床版		目標 耐用年数	材質
			本数	高さ (mm)	幅 (mm)	厚さ (mm)	幅 (mm)		
A橋	7.47	1.2	3	270	210	45	95	15	杉
B橋	1.60			90	90				
C橋	4.72			185	150				

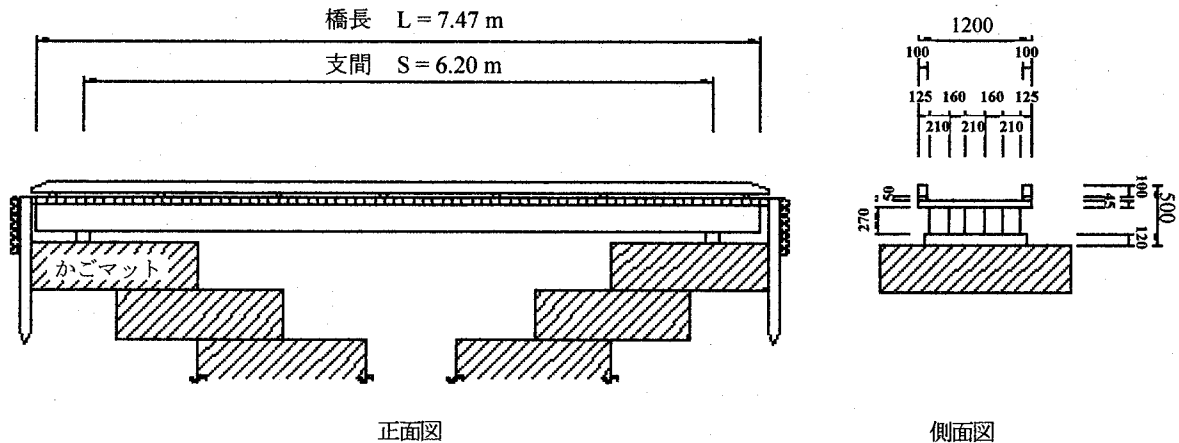


図-11 施工事例 一般図 (A橋)

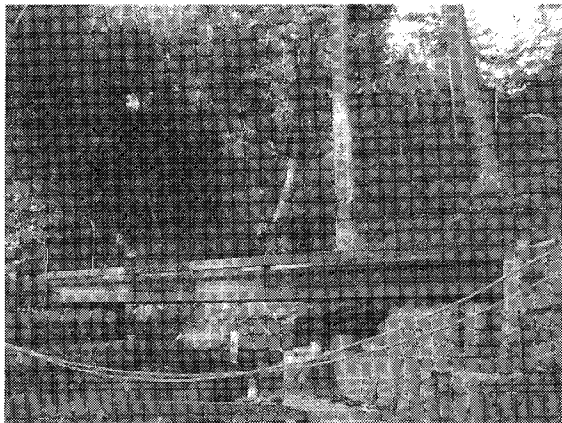


写真-2 A橋全景

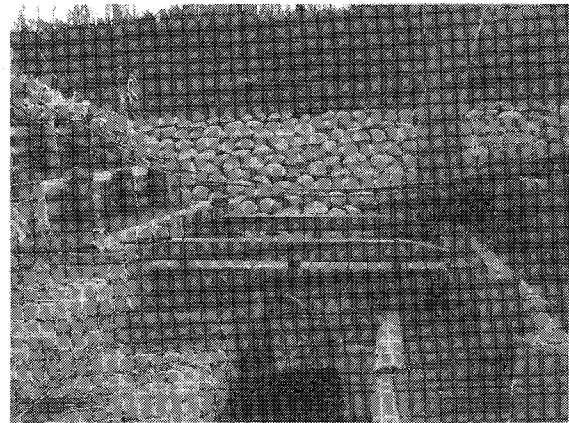


写真-3 B橋全景

A 橋 (写真-2) は、河川環境整備の一環として施工されたものである。製材を用いた単純桁橋としては比較的小支間であり、周辺との取り付けの制約から斜橋となっている。周辺は杭柵が工事に使用される等、環境面に配慮されていることからコンクリート橋台は使用せず、自重の軽い木橋の特徴を活かして、かごマットの上に設置した。腐朽しやすい枕桁部分が、かごマットの上に位置するため、耐久性の向上も期待できる。

B 橋 (写真-3) も A 橋と近接の現場に同時期に施工されたものである。軽量であることから、工場において製作されたものを一括架設することにより極めて容易かつ短時間に架設された。また、全重量は大人2名でも運搬可能な程度であるため、点検や補修のための労力軽減も期待できる。

C 橋 (写真-4) は、公園整備の一環として施工された木橋である。本橋の特徴は、一方の支点にヒンジを設ける

ことで木橋を開閉することができる可動システム²⁴⁾が追加されていることである。特殊な機材を用いることなく写真-5のように人力で簡単に木橋を持ち上げることができるため、桁下空間の小さな木歩道橋で困難となる下からの点検や補修が容易である。ヒンジ部の金具はドア用の蝶板をもとに製作されており、可動システムとすることによるコストアップは10%以下となっている。今後の維持管理に要する費用を考慮すると十分なコスト縮減が期待できることがわかる。

これらの3橋の事例については、前述のとおり上部工の単価の事例との比較を示した図-5にプロットされている。橋長1.6mのB橋の価格が試算例よりやや下回っているのは、橋長7.47mのA橋と近接の現場における同時期の施工であり、架設時の諸経費を節減できたことによるが、施工事例と試設計の結果はよく一致しており、今回のコスト評価は十分現実に適ったものといえる。

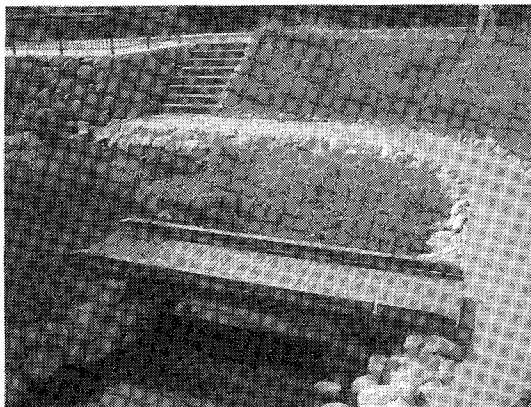


写真-4 C 橋全景

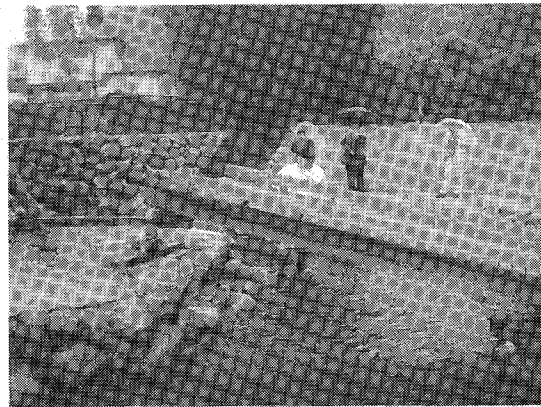


写真-5 C 橋 開閉状況

5. まとめ

本論文では、あらかじめ利用目的に応じて一定の耐用年数を想定し、その耐用年にあった設計・施工、点検・維持管理を行うことを目的とした小規模歩道橋を例に、コスト及び環境負荷に対する評価を行った。得られた知見をまとめると以下のとおりとなる。

- ① 木橋のコストは架設コストにおいても維持管理を考慮したトータルコストにおいても、コンクリートによる一般橋と遜色ないか、それ以下のレベルである。一方で一般橋は維持管理コストが小さい点で有利ではあるが、処分コストが大きい点でトータルコストとしては有利とは言い難い。
- ② 15 年タイプは維持管理や補修の頻度が高いことから、橋長や供用期間に維持管理費が影響を受けやすいが、初期費用が小さいため、一般橋や 30 年タイプと比較しても耐用年数を 15 年とすればライフサイクルコストの観点では大差ない。
- ③ 木橋の環境負荷は一般橋より小さい。また、この傾向は橋長が大きくなるほど著しくなる。
- ④ 総じて、木橋はこの程度のスペックであれば一般橋と比較してコスト面や環境負荷の面で有利であるといえる。

参考文献

- 1) 今井富士夫, 飯村豊, 入江達雄, 中澤隆雄: かりこぼうず大橋の材料および力学性状, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.865-872, 2004.
- 2) 廣田武聖, 入江達雄, 久留島卓郎: かりこぼうず大橋の計画・設計, 第2回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp15-20, 2003.
- 3) 有村英樹, 木場和義, 一瀬浩二, 細田直久: 世界最大級の支間を有する車道木橋 (かりこぼうず大橋) の施工, 第2回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp21-28, 2003.
- 4) L. Sunuwar, Y. Itoh, H. Nagata, T. Nshido, Characteristics of Environmental Impact of Bridges for Type Selection, Journal of Civil Engineering Information Processing System, Vol.6, JSCE, pp.173-180, 1997.
- 5) 伊藤義人, 永田裕規, スワル ラクシマン, 西川和廣, 地球環境負荷削減のための橋梁ライフサイクル評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1295-1305, 1999.
- 6) 伊藤義人, 梅田健貴, 西川和廣, 少数主桁橋梁と従来型橋梁のライフサイクル環境負荷とコストの比較研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1261-1272, 2000.
- 7) 伊藤義人, 梅田健貴, 岩田厚司, 橋梁のライフサイクル環境負荷および建設副産物発生量に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1109-1118, 2001.
- 8) A. H. Buchanan: Timber Engineering and the Greenhouse Effect, Proceeding of 1990 International Timber Engineering Conference, pp931-937, 1990.
- 9) 中島史郎, 大熊幹章: 地球温暖化防止行動としての木材利用の促進: 木材工業, Vol.46, No3, pp.127-131, 1991
- 10) 大熊幹章: 炭素ストック, CO₂収支の観点から見た木材利用の評価: 木材工業, Vol.53, No2, pp.54-59, 1998
- 11) 建設省公園緑地課: みんなのための公園づくり, 1999
- 12) (財)公園緑地管理財団: 公園管理ガイドブック, 1985.
- 13) 原価焼却資産の耐用年数表, 2005.8
- 14) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2002.
- 15) (社)日本道路協会: 立体横断施設技術基準・同解説, 1979.
- 16) 日本建築学会: 木質構造設計基準・同解説, 2002.
- 17) (財)日本住宅・木材技術センター: 木橋づくり新時代, 1995.
- 18) (財)建設物価調査会: 建設物価, 2003.8.
- 19) (財)経済調査会: 積算資料, 2003.8.
- 20) 国土交通省大臣官房技術調査課: 国土交通省土木工事積算基準 平成 15 年度版, 2003
- 21) 林野庁: 平成 15 年度版森林土木木製構造物施工マニュアル, 2003.
- 22) (社)全国防災協会: 災害復旧工事の設計要領, 2003.
- 23) 熊本県: 平成 15 年度熊本県労務・技術者単価表
- 24) 上月裕, 田畑健太郎, 渡辺浩: 可動システムを有する歩道木橋の提案と試設計: 第2回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp141-148, 2003

(2005 年 9 月 10 日受付)