

木橋（もっきょう）の現状と課題*

小松 幸平**

Modern Timber Bridges—State of the Arts

Kohei KOMATSU

(平成11年8月30日受理)

1. はじめに

戦後の我国において、土木工学的に厳密な設計手順¹⁾を踏んで設計・架設された最初の近代的木橋は、図1に示す秋田県鷹巣町の坊川林道2号橋であろう。

秋田スギ集成材を用いた橋長6mのトラックの通れるこの単純桁橋は、1987（昭和62）年10月に完成した。今から12年前のことである。秋田営林局と秋田大学鉱山学部土木環境工学科の長谷部、薄木氏らによるスギ集成材を用いた木橋への取組み¹⁻³⁾が、我が国における近代木橋再興の幕開けとなった。



図1 坊川林道2号橋（秋田県鷹巣町）

2. 過去10数年間の歩み

長谷部、薄木氏らの最初の試みから最近までの過去10数年間において、我が国で設計・架設された自動車の通れる近代木橋の代表例を表1に、また収録した木橋の写真を以下の図2～図13に示す。

表1を見ると、結果的には、ほとんど全ての近代木橋が地元産のスギを原料とする集成材を用いた林道橋（例外的に北米から輸入されたベイマツ集成材を用いた木橋⁴⁾も含まれているが）であることに気付く。

* 第54回木研公開講演（平成11年5月28日、宇治）において講演

** 京都大学木質科学研究所構造機能分野 (Laboratory of Structural Function)

Keywords : Domestic softwood glulam, PSLT deck, Girder, Joints, Preservatives

表1 過去10数年間に我が国で架設された代表的な木道路橋 (林道橋)

橋の名称	場所	等級 (設計荷重)	橋長 (支間) m	橋の型式・特徴・樹種等	主たる関係者 (上部構)
①坊川林道 2号橋	秋田県鷹 巣町 (鷹 巣営林所 管内坊川 林道)	二等橋 (TL-14)	6.0 (5.6)	通直集成材による単純桁橋。我国における近代木道路橋 (14 ton トラック通行可) の第一号。CCA 加圧注入済みスギ集成材 ($h=60$ cm) 使用。1987 (昭和62) 年10月完成。支点に初めてゴム支承が採用された。	秋田営林局, 秋田大学土木 環境工学科
②鶴養橋 (うやしな い橋)	秋田県河 辺町 (鶴 養林道)	二等橋 (TL-14)	14.0 (13.6)	通直集成材による単純桁橋。スギ集成材 ($h=99$ cm) 使用。防腐剤加圧注入不可能なため、防腐薬剤3回塗布塗り+一部コールタール塗布。1988 (昭和63) 年秋完成。	秋田営林局, 秋田大学土木 環境工学科
③湯ノ又橋	秋田県五 城目町	二等橋 (TL-14)	13.5 (13.0)	鋼・集成材複合タイドアーチ橋。スギ集成材に銅板葺きの屋根を直張り。1990 (平成2) 年3月完成。	秋田大学土木 環境工学科, 相沢銘木
④用倉大橋 (サイクリ ングロード 1号橋)	広島県本 郷町 (中 央森林公 園内)	二等橋 (TL-14)	145.0	ベイマツ集成材のトラス構造の主桁をワイヤーで張った3径間斜張橋。世界最長の本製斜張橋。防腐薬剤をインサイジング処理した集成材に加圧注入+防腐塗装。1992 (平成4) 年10月完成	三井木材工業, WWS (米国)
⑤中央橋 (サイクリ ングロード 8号橋)	広島県本 郷町 (中 央森林公 園内)	二等橋 (TL-14)	34.0	ベイマツ集成材を用いた上路アーチ橋。防腐薬剤をインサイジング処理した集成材に加圧注入+防腐塗装。1993 (平成5) 年3月完成。	三井木材工業, WWS (米国)
⑥揚の沢橋	秋田県鷹 巣町	二等橋 (TL-14)	8.02	我が国最初のプレストレス木床板 (PSLT) 橋。作用応力に応じて、カラマツ、ナラ、スギ集成材が使い分けられている。橋の構造は2ヒンジボックスカルバート橋。針葉樹にはクレオソート加圧注入、ナラには防腐塗装。1993 (平成5) 年10月完成。	秋田営林局, 秋田大学土木 環境工学科, 相沢銘木
⑦栗飯戸橋	奈良県黒 滝村村道 栗飯戸線	一等橋 (TL-20)	26.5 (24.6)	アーチ材には桧集成材、床板にはバツ製材、縦桁にはベイマツ集成材を用いたタイドアーチ橋。アーチ材はラミナ段階でDDAC 加圧注入処理。通直集成材は集成材完成後加圧注入。床板はCCA 加圧注入。1994 (平成6) 年2月完成。	トリスミ集成 材
⑧神の森大 橋	愛媛県広 田村玉谷 川	一等橋 (TL-20)	26.36 (23)	20 tonf 荷重を考慮し、土木工学的に厳密な観点から近代木橋として設計された我が国最初の2ヒンジ中路アーチ橋。アーチ材は地元産スギ集成材。ラミナの段階でDDAC 加圧注入して積層接着した。イエローサザンパイン製材を用いたPSLT 床板はクレオソート注入。アーチ上面に銅板葺き小屋根、水平骨組み部材上に銅板葺きの大屋根施工。1994 (平成6) 年5月完成。	日本住木セン ター木橋委員 会銘建工業, ザイエンス

小松：木橋（もつきょう）の現状と課題

橋の名称	場所	等級 (設計荷重)	橋長 (支間) m	橋の型式・特徴・樹種等	主たる関係者 (上部構)
⑨ 木の 棧 (かけはし)	長野県木 曾郡上松 町林道台 が峰線	A活荷重 25 ton	40.0	我が国の木橋として、初めてA活荷重 (25 tonf) で設計された4径間連続 PSLT 木床板による棧。有名な「木曾の 棧」をモチーフにした。床板は地元産カ ラマツ＋一部イエローサザンパイン。ク レオソート加圧注入。1996（平成8）年 9月完成。	日本住木セン ター木橋委員 会，林業土木 コンサルタント ，齊藤木材 工業
⑩みどり橋	長野県木 曾郡三岳 村	A活荷重 25 ton	30 (29.5)	すべてカラマツ集成材で出来たπ型 ラーメン橋。防腐剤の加圧注入は行わ ず，防腐薬剤処理＋塗布処理。床板は PSLT 床板。縦桁は2カ所で剛接合。 1996（平成8）年11月完成。	日本住木セン ター木橋委員 会，前田屋外 美術，林友
⑪すぎのき 橋	宮崎県小 林市大字 細野字山 中之前 (宮崎県 民の森)	A荷重 25 ton	38.6 (38)	A活荷重で設計された単スパンの木橋と しては我国最長の規模。上路アーチ橋 で，アーチ材，PSLT 床板には主として 地元産スギが，高欄等には桧が用いられ る。アーチ接合部はエポキシ樹脂注入型 鋼板挿入ドリフトピン接合法採用。別途 接合部の繰り返し疲労試験も実施。防腐 方法はラミナ段階での DDAC 加圧注 入。1997（平成9）年3月完成。	日本住木セン ター木橋委員 会，林業土木 コンサルタント ，山佐木材
⑫虹の木橋	山梨県都 留市	A活荷重 25 ton	23.0	アーチ部材に地元産のスギ集成材を用い た中路式アーチ橋。床板にもスギ集成材 (最外部のみナラ集成材) を用いた PSLT 床板。アーチ上面と横構等を鋼板 で被覆している。高欄接合部に衝撃吸収 性能を高めた接合法を採用。鋼製の吊り 材(φ50 mm) をハウの木で被覆してい る。1998（平成10）年12月完成。	日本住木セン ター木橋委員 会，林業土木 コンサルタント
⑬百目石 (ひゃくめ いし) 橋	秋田県協 和町	A活荷重 25 ton	20.9	スギ集成材のアーチ部材を鋼製のタイ (繋ぎ材) で結んだ下路タイドアーチ橋。 形態は湯の又橋と類似しているが，ス ケールアップされた。2本のアーチリブ が互いに独立しているのが特徴。アーチ および PSLT 床版はラミナ段階で AAC 防腐剤を加圧注入。高欄支柱と地覆木の 接合に秋田木高研で開発された木ダボ接 合法が初めて採用された。PSLT 床板の 圧縮圧力を電話回線を通じて常時遠隔測 定中。1999（平成11）年3月完成。	林業土木コン サルタント， 秋田大学，秋 田県立大学木 材高度加工研 究所，秋田グ ルーラム
⑭阿蘇望 (あそぼう 橋)	熊本県波 野村	A活荷重 25 ton	40.0	A活荷重で設計された我国初の屋根付き 近代木橋。形式は平行弦ラチストラス 橋。上弦材，斜材，水平力を受ける門型 架構等はすべて地元産のスギ大断面集成 材。下弦材は鉄骨である。床板は PSLT 床板型式。1999（平成11）年完成。	林業土木コン サルタント， 山佐木材

これら一連の事例を見ると、我が国も世界有数の木橋国になったという気がする。事実、世界各国の事情を見ても、これだけの数の新しい近代木橋を有する国は極めてまれである。しかし、設計マニュアルの整備やオリジナリティー（独創性）という面から見ると、残念ながら開発途上にあると言わざるを



図2 鶉養（うやしない）橋（秋田県河辺町）

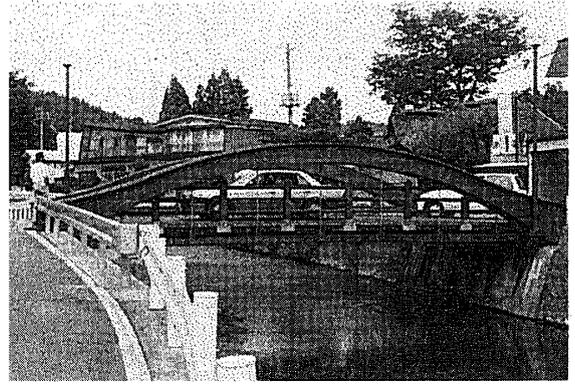


図3 湯ノ又橋（秋田県五城目町）

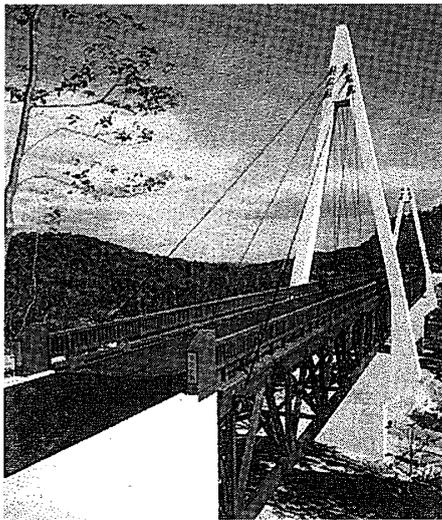


図4 用倉大橋（広島県本郷町：中央森林公園）

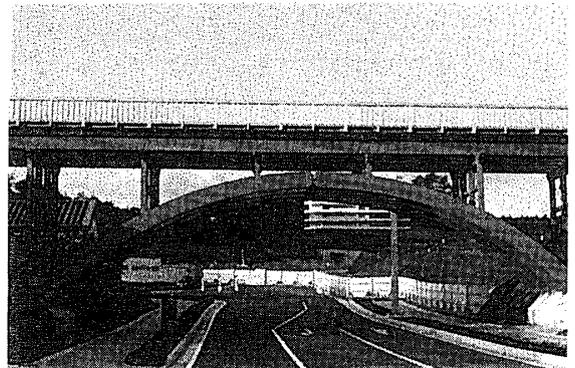


図5 中央橋（広島県本郷町：中央森林公園）

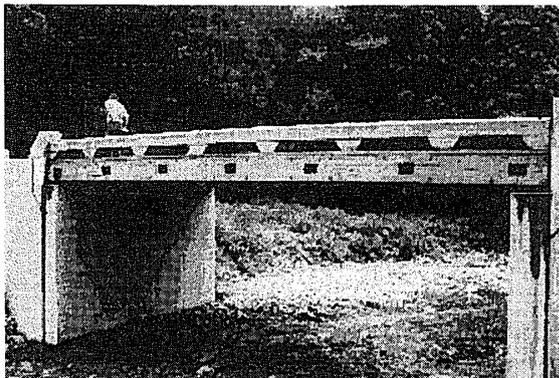


図6 揚の沢橋（秋田県鷹巣町）

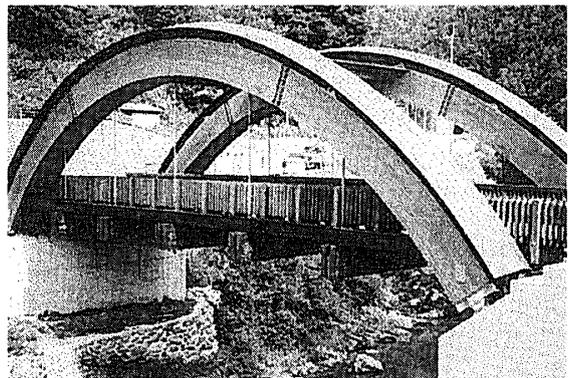


図7 神の森大橋（愛媛県広田村）

小松：木橋（もっきょう）の現状と課題

得ない。

言うまでもなく、近代木橋を設計してゆく上で最大のポイントは、木材（集成材）をいかに腐らせずに使用していくかという点である。この重要ポイントは木橋を指向している世界各国に共通している切実な問題であるが、一つの解決策を除いて、未だに完璧な解決策は見つかっていない。

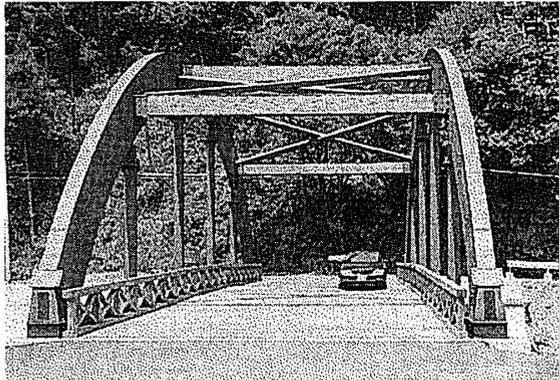


図8 粟飯戸橋（奈良県黒滝村）

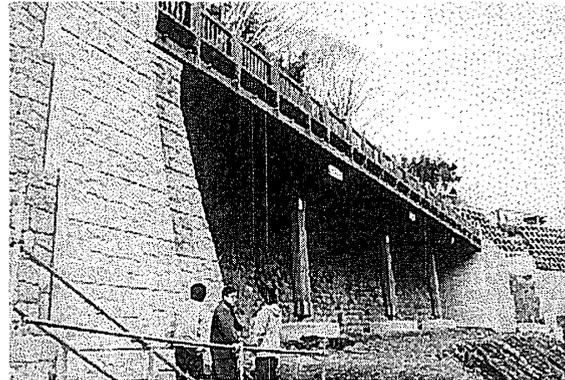


図9 木の棧（長野県木曾郡）

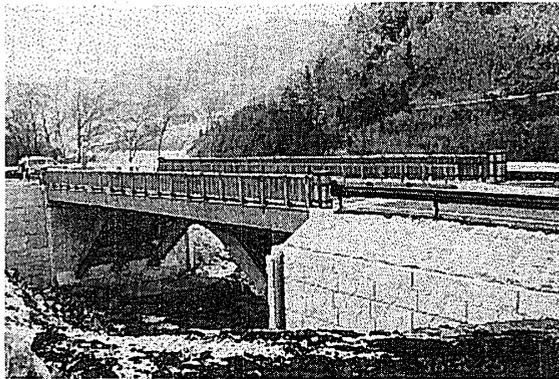


図10 みどり橋（長野県三岳村）



図11 すぎの木橋（宮崎県小林市）

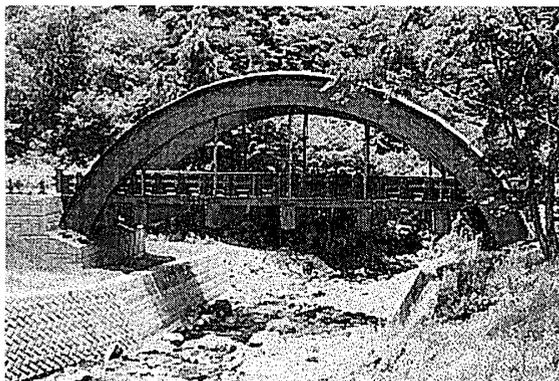


図12 虹の木橋（山梨県都留市）



図13 百目石橋（秋田県協和町）

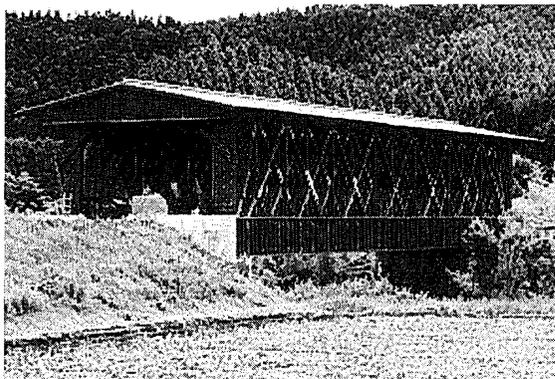


図14 阿蘇望橋 (熊本県波野村)

3. 近代木橋が抱える最大の課題 —いかに耐久(朽)性を付与するか—

近代木橋の抱える最大の技術課題は、橋をいかに腐朽、風化から守り、永久橋として信頼性の高い構造を維持してゆくかという問題である。一つの解決策というのは、「木橋」に屋根を架けることである。スイスや北米の古い木橋は全て屋根付き木橋(カバードブリッジ)である。屋根を付けた木橋は、部材自体がたとえ防腐処理されていなくとも、50年以上大修理の必要もなく使用できるという事実を、現存する多くの屋根付き木橋が証明している。

図15は現存する木橋としては世界最古のものに属すると考えられるスイスの屋根付き木橋の内部を示す(15世紀に建造され、これまで世界最古を誇ってきた同じルツェルンのカペル橋は、最近大部分が火災で焼失したため、現在では隣に架設されているこのスプロイヤー橋が最古の現役木橋と推定される⁵⁾)。

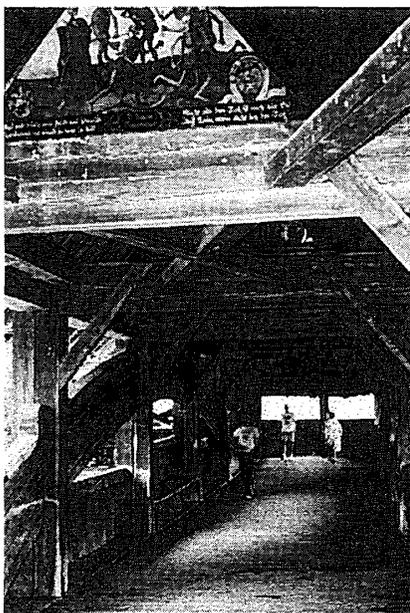


図15 スプロイヤー橋 (スイス、ルツェルン市)

4. 耐久（朽）性を高めるための努力

4.1 構造的耐久性付与

環境に与える影響が最も少なく、かつ確実に木橋の耐久（朽）性を高められるのは屋根を付けることである。しかし、屋根を付けることは以下の制約を招く。

- 建設コストが余計にかかる（反面、長期に亘るメンテナンスフリーが約束される）。
- 屋根のある橋という概念が我が国の橋梁研究者、コンサルタントには希薄であり、屋根を取り入れた橋のデザインが容易ではない。
- 高さの制限を招く。

次善の策として、橋の部材ごとに耐久性のグレードを設定し、絶対に腐らせたくない部材を他の部材で保護するという方法がある。例えば、床板を出来るだけ張り出して主桁に雨水が掛かるのを防ぐ（図16）、あるいは主桁をブラインドのような部材で保護する⁶⁾（図17）等の方法がある。

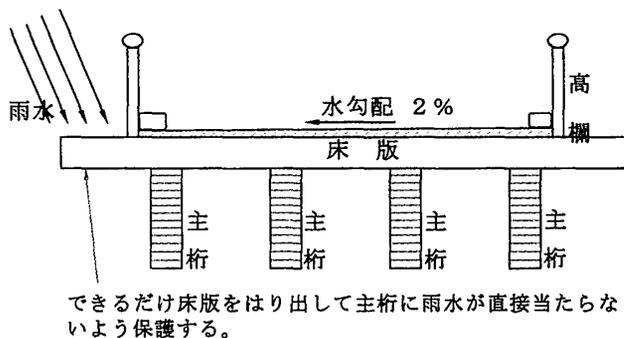


図16 床板による主桁の保護（概念）

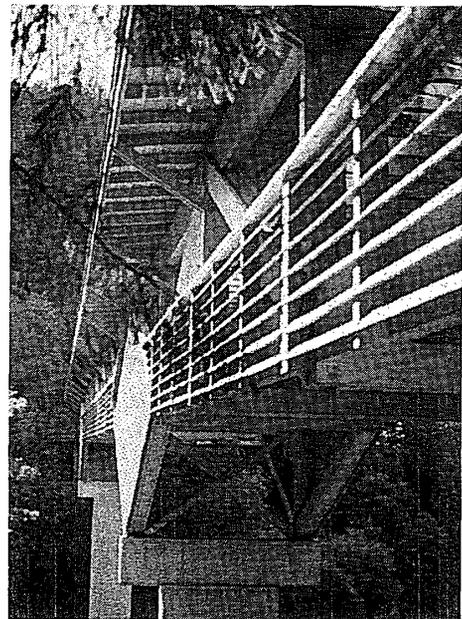


図17 ブラインドによる主桁（平行弦トラスの下弦材）の保護（スイスの自転車橋の例）

4.2 化学的耐久（朽）性付与

a. ラミナ段階での防腐剤の加圧注入

集成材を作る前段階のラミナの段階で防腐剤を加圧注入してから集成材を作る（図18）。我が国における大部分の近代木橋で採用されている方法である。これまでの所、積層接着に悪い影響を与えることの少ない防腐剤として、水溶性 DDAC が推奨されている⁷⁾。

ラミナ段階での防腐処理のメリットは；

- 大断面の集成材の内部にほぼ均一に防腐剤を浸透させることが可能。
- 完成した集成材では大きすぎて防腐処理出来ないものまで、比較的容易に防腐処理が可能である。

デメリットは；

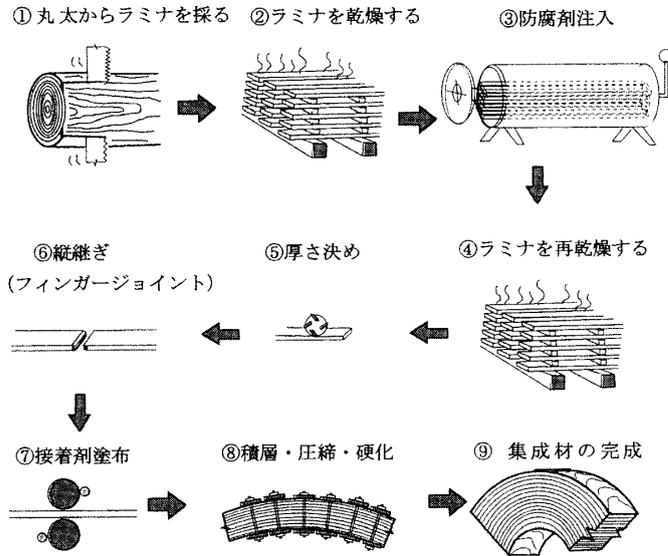


図18 ラミナ段階で防腐処理する方法

- 水溶性の防腐剤を使うため、一度人工乾燥したラミナを再度人工乾燥するなど、手間とコスト（歩留まりが更に落ちる）が掛かる。なお最近では、水溶性の防腐剤を用いる代わりに、有機溶媒系の防腐剤を用い、加圧注入後溶剤を回収するタイプも実用化され、ラミナの再乾燥に伴うコストアップを抑制しようとする動きも見られる。
- 少ないとはいえ、接着剝離が完全に起こらないとは言えない¹¹⁾（図19参照）。
 - b. 集成材になってからの防腐剤処理の問題点
- 防腐薬剤の注入管の大きさが限られており、最近の木橋、特に自動車の通れる木橋のように、集成材の断面が極めて大きいもの（材せい1.0~1.5 m というものが多い）では、加圧注入処理は極めて困難である。

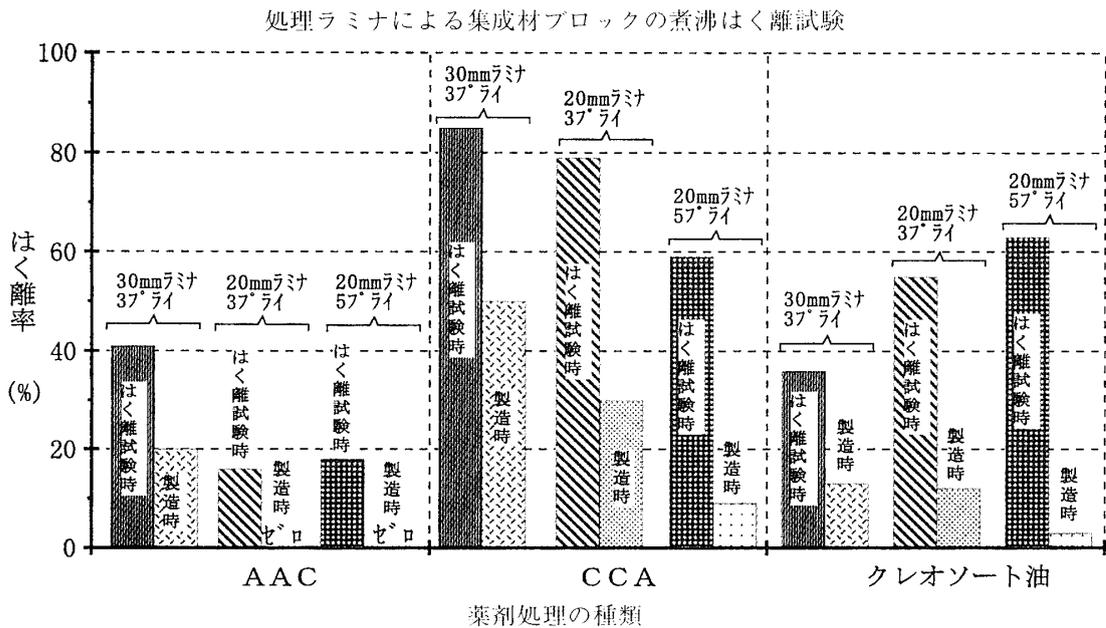


図19 ラミナ段階での処理が積層接着に及ぼす影響

・湾曲集成材を注入管に入れることは一般的には難しい。

c. 防腐処理にまつわる問題点

・最も効力の高いクレオソートに幾つかの問題点が指摘されている。

1) クレオソートを加圧注入した PSLT 床板は圧力を掛けるとクレオソートが飛び出して、作業員に害を及ぼす場合もある。

2) クレオソートを加圧注入した PSLT 床板はアスファルト舗装時の熱でクレオソートが溶脱し、アスファルトを溶かす場合もある。

3) クレオソートは長時間経過後に、アスファルト舗装に害を与える場合もある。このため、クレオソートを含浸させた床板とアスファルト舗装との間を完全に遮断するための化学的に犯されない強靱なシート状の材料が必要である。

・クレオソートについて効力の高い防腐剤である CCA は、処理材の廃棄処分時に環境を汚染する点が問題であり、徐々に使われなくなってきている。

・水溶性の防腐剤は薬剤処理前と処理後の2度人工乾燥せねばならないので、コスト高となりがちである。

d. 現実的な解決策

・可能な限り「構造的耐久性付与」に努める。具体的には；

1) 屋根が付けられないかどうかを検討する（長期的に見るとメンテナンスフリーとなることを考慮する）。

2) 主要構造部材の表面を何らかの遮蔽材で覆う（床板、ブラインド等）。

3) どの部材にも水勾配を付けて、雨水が長時間停留しないように配慮する。

4) 木口面には必ず銅、ステンレス等のカバーを付ける。

5) 複雑な部材の取り合いは水を停留させる場合が多い。水の流れを設計段階から十分検討して、確実に排水できるルートを確保する。また、水はけ、通風のよいディテールを心がける。

・「構造的耐久性付与」を最大限優先し、「化学的耐久性付与」は2次的な手段と心得る。

・アスファルト舗装終了後、更に床板に孔を明けるような施工（例：地覆木の取り付け等）は避ける。

5. 接合の問題

木橋のスパンが12m以内の頃は、接合の問題は生じなかった。しかし、最近ではスパンが30mを超える自動車が通行可能な木橋（林道に限られる）も登場してきており、接合部が受ける荷重も年々大きくなってきている。

現在一般的に使われている機械的接合法を用いる限り、木材接合部の強度接合効率（接合部を有する場合の耐力/接合がない場合の耐力）は、高々80%程度である。鋼橋のように全強（効率100%）を期待することはできない。ただし、例外的な事例として、スギ集成材を広葉樹木ダボとポリウレタン接着剤を用いて接着接合する方法の場合、接合効率を100%まで高めることが可能である⁹⁾。

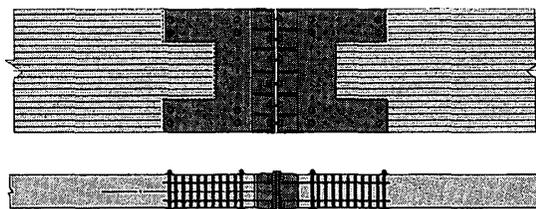


図20 鋼板挿入ドリフトピン接合法（概念）

図20に我が国の近代木橋の集成材部材（実際にはアーチ部材が多い）の接合に多用されている鋼板挿入ドリフトピン接合部¹⁰⁾の概要を示す。

現在の木橋設計では無視されがちであるが、集成材接合部は変形を起こす。特にモーメントが作用する場合は回転変形を起こすので、精密な設計が要求される場合は、接合部の剛性を考慮した計算が必要である。とりわけ、設計荷重がA活荷重となり、建築とは比較にならない大荷重が繰り返し作用する林道橋の場合、接合部の繰り返し疲労強度の問題を真剣に考慮する必要がある。

林道橋の接合部には今以上に剛性と強度が必要であると考えられる。図21に概念を示す秋田県大館樹海ドームで使用された接合部のような、メカニカルジョイント（ボルト+ドリフトピン）と接着剤を併用したハイブリッド型の接合が今後は益々必要となろう¹¹⁾。

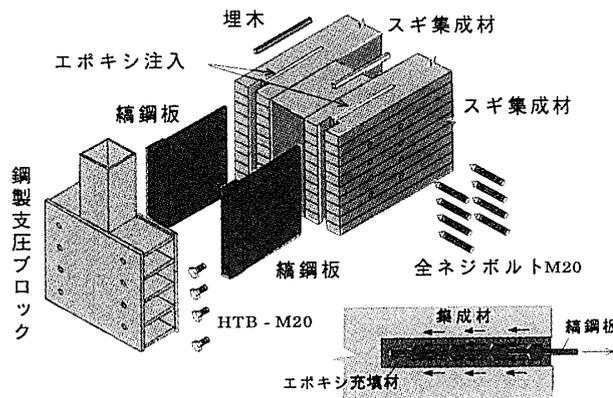


図21 接着接合と鋼板挿入ドリフトピン接合がミックスされた接合法（秋田県大館樹海ドームで開発された接合法）

6. 終わりに

木橋というものは不思議な存在である。何故、一度完全に廃れてしまった存在に、世界中で、それもほぼ時を同じくして、このように熱くその再興を期待するのであろうか？

筆者のようにティンバーエンジニアリングの証として木橋の再興に期待を掛ける者もいる。地域の身近なランドマークとしての存在価値を主張する人もいる。あるいは、北米やオーストラリアのPSLT橋のように、コストが安いから使うという誠に明快な理由の場合もある。

要するに、木橋というものは、単純な交通運輸機能面の価値だけで評価したのでは、とても肩身の狭い存在なのである。木橋を掛けることによる周辺の自然環境に及ぼす有形、無形の影響、地場の木材産業の振興、土木、木材工学境界領域の学術レベル向上への貢献等々、様々な波及効果を主張せずには存在しえないものである。

木橋が一時のブームに終わることなく、文字通り地に足の着いた確固たる存在となるよう、関係者一同の更なる努力が期待されている。

謝 辞

本稿を書くにあたり、秋田県立大学木材高度加工研究所の佐々木貴信氏、並びに(財)林業土木コンサルタンツ附属研究所の奥谷由行氏より貴重な資料を頂戴した。また、山佐木材(株)には木橋の現場調査等大変お世話になった。ここに記して厚く御礼申し上げます。

引用・参考文献

- 1) 長谷部 薫, 薄木征三:「集成材を主桁とした格子桁の解析と実験的研究」, 土木学会論文集, 第397号/VI-9, p. 85-94 (1988)
- 2) 長谷部 薫, 薄木征三:「集成材格子桁橋鶴養林道橋の現場実験と解析」, 構造工学論文集, Vol. 35A, p. 879-887 (1989)
- 3) 薄木征三, 堀江 保, 長谷部 薫, 鈴木和広:「鋼・集成木材複合タイドアーチ橋の実橋設計と載荷試験」, 構造工学論文集, Vol. 37A, p. 1063-1074 (1991)
- 4) 飯村 豊:「集成材を用いた木造斜張橋について」, 橋梁, Vol. 28, No. 6 (1992)
- 5) Werner BLASER: “Schweizer Holzbrücken”, Birkhäuser Verlag, Basel (1982)
- 6) K. GÄRTL: Holzbrücke über die Simme bei Reuitigen-Wimmis BE: LIGNUM informert zu Holz (Schweizer Holzbau Nr. 9, 1989 より再録)
- 7) 財団法人日本住宅・木材技術センター編著: 木橋設計施工の手引き。木橋づくり新時代, ぎょうせい, 平成7年
- 8) 小松幸平: “接合研究の立場から木質構造の耐久性を考える”, シンポジウム「木質材料・木質構造の耐久性」, 日本学術会議 木材学研究連絡委員会, p. 27-42 (1995)
- 9) 例えば; 佐々木貴信, 小泉章夫, Jørgen L. JENSEN, 飯島泰男, 田村靖夫, 小松幸平: “木ダボによる構造材の縦継ぎ (第1報) ダボ列1層のときの曲げ性能”, 木材学会誌, **45**(1), 17-24 (1999)
- 10) Kohei KOMATSU, Seizo USUKI: “Glulam arch bridge and design of it's moment-resisting joints”, Proceedings of the 27th Meeting of the International Council for Building Research Studies and Documentation, Working Commission W18 - Timber Structures, CIB-W18/27-07-01, Sydney, Australia, July (1994)
- 11) 小松幸平: “大規模木質構造「集成材ドームから木橋まで」ティンバーエンジニアリングにおける接着・接合”, 日本接着学会誌, **32**(11), 23-28 (1996)