

木構造研究者の立場から見た近代木橋の再興について

On the coming-back of modern timber bridges from view-point of timber engineering researcher

○小松幸平*

KOMATSU Kohei

*農博 京都大学 生存圏研究所 生活圏構造機能分野 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

ABSTRACT From a Timber Engineering point of view, various cases in which the author took part of something like joint's design and so on for modern timber bridges, were briefly reviewed. Results of evaluation experiments for the moment-resisting joints in Kaminomori bridge (Glulam arch bridge) was first introduced. Characteristic topics on a series of timber bridges, which were built after Kaminomori Bridge, were outlined. Development of flexible timber bridge post structure by making use of slip deformation at steel joints was explained in details. Finally, application of timber dowel joints for heavy traffic load bridge was introduced.

Keywords : 近代木橋、集成材、モーメント抵抗接合

Modern Timber Bridges, Glued Laminated Timber, Moment-Resisting Joints

1. はじめに

近代木橋と呼ばれる新しいジャンルに属する木橋が日本に再登場したのは、昭和62、3年頃(1987、1988年頃)と考えられる。秋田営林局と秋田大学土木工学科の先進的な取り組みがその発端であり、今日の近代木橋の繁栄をもたらした源となったことは、関係者の間では広く知られている所である。

一方、建築の分野でも、大規模な木構造を再興しようという機運が、やはり昭和60年頃から盛んになり、日本建築学会や日本木材学会に属する木構造研究を指向する研究者や技術者を中心に、木構造を設計するための工学、すなわちTimber Engineering に関係した色々な活動が各地で盛んに行われるようになった。

筆者も、ちょうどTimber Engineering に関係した研究領域を専門としていた関係で、幸運にも大規模木構造の世界と、近代木橋の世界の両方にまたがった研究に参画するチャンスに恵まれた。

本稿では、幾つかの近代木橋の設計プロジェクトに参加した木構造研究者の視点から見た木橋再興の経過を紹介したい。

2. 日本住宅・木材技術センターにおける木橋プロジェクト

日本住宅・木材技術センターが事業の推進母体となって、昭和の時代から継続されてきた農林水産省の補助事業「木造化推進標準設計施工マニュアル作成等事業」の中に、「建造物適用技術推進」という新しいプロジェクトが加えられた。平成元年のことであった¹⁾。

このプロジェクトには更に幾つかの分科会が設けられ、「木橋分科会」という小さなワーキンググループも誕生した。メンバーは、既に幾つかの近代木橋の構造設計を経験され、我が国における近代木橋の生みの親とも言える秋田大学鉱山学部土木工学科の薄木先生、鉄道技研で長年鋼橋を担当されてきた足利工業大学土木工学科の阿部先生、林業土木コンサルタントで橋の経験豊かな廣田氏、木材防腐の専門家の森林総研の鈴木氏、集成材製造の専門家である銘建工業の坂本氏、そして接合の専門家ということで森林総研に勤務していた筆者が分科会主査を担当した。今思うと、木橋の設計・施工を考える分科会としては、うまくバランスの取れたメンバー構成であった。

当初は、公園内部に架設する小型の人道橋等について、その望ましい姿はどう在るべきかとい

った座談会的な議論が中心であった。翌年あたりから、木橋の設計に使える近代的な示方書が存在しないという状況を改善するため、近代木橋をターゲットとした設計・施工真マニュアルを策定することが分科会活動の中心となった。

更に分科会活動の進展に伴って、分科会で目標とする木橋の規模がどんどん大規模なものへと発展し、ついには集成材アーチ形式の一等橋を設計・施工することになった。いわゆる、愛媛県広田村が発注者である「神の森大橋」(自治省および林野庁の「ふるさと林道緊急整備事業費」による)の設計事業である²⁾。

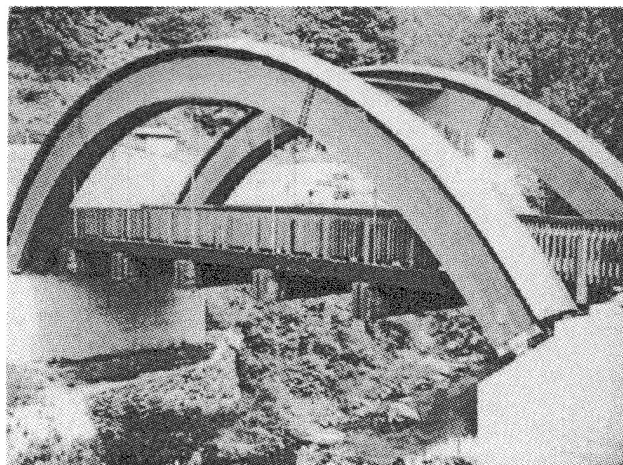


写真-1 神の森大橋 (完成時の写真)

写真-1に示すこの木橋において特記すべき点は以下の通りである。

- (1) 土木工学的に厳密に設計された近代木橋としては、我が国最初の一等橋である。
- (2) アーチリブ他主要な構造部材に、地元産出の「スギ」大断面集成材を使用している。
- (3) 化学的に耐久性を付与するため、集成材ラミナの段階で防腐剤 (DDAC) を注入し、その後積層接着して大断面集成材を製造している。防腐剤注入が接着力に及ぼす影響については、森林総研や奈良林試等で実験を行い、JAS の接着耐久性試験に合格することを確認している。
- (4) 床の構造に、北米で盛んな「プレストレス床板」という方法を採用している。
- (5) 構造的に耐久性を増すために、アーチリブの全長にわたって、その上面に小屋根を付け、更に対傾構、横構等が集中する部分に大屋根を設置している。
- (6) アーチリブの運送上の制約から、アーチリブの2カ所に接合部を儲け、現場で剛接合している。
- (7) アーチリブの横安定性を増すために、アーチリブをダブルに、かつ間隔を広くとって箱型に配置している。

上述した木橋分科会は、橋の構造設計、施工管理、完成後の設計・施工マニュアル作りまで、全てを実際に委員会のメンバーが担当した。それ以降の木橋では、実際の細々した設計業務はコンサルタント会社に任せるケースが常識であることを考えると、かなり熱の入った分科会であった。

薄木先生は木橋全体のデザインから構造設計に至る全ての面で奮闘された。筆者は、アーチリブの剛接合部を始めとする各部の接合部の設計を担当し、アーチ部材の接合耐力と Box 断面になったアーチ部材の挙動を確認するため、1/2 に縮小したモデル試験体で確認のため

の実験を実施した³⁾。ただし、実際の部材は湾曲集成材であったが、実験には写真-2 に示す通直集成材を用いた。最も苦労した点は、ドリフトピンの直径 ($d=16\text{mm}$) を本物の 1/2 にしたために、接合部が非常に細くなって、ドリフトピンとドリフトピンの間に小さなストレインゲージを貼る作業が大変であった。実際のゲージ貼付作業は、薄木研究室の卒論生2名が、秋田から筑波に駆けつけてくれて、夜遅くまで続く厳しい貼付作業をこなしてくれた。残念ながら彼らの名前を忘れてしまったが、この場をお借りして改めてその熱意と努力に感謝の気持ちを伝えたい。

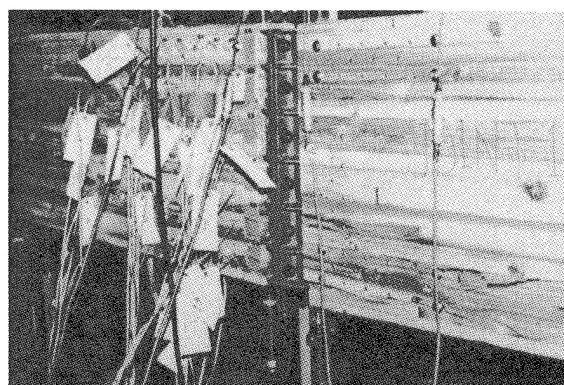


写真-2 1/2 スケールモデルによるアーチ剛接合部の強度確認実験

図-1 にアーチ接合部試験体の荷重-変形関係を示す。設計荷重（建築関係で言う長期設計荷重）が $P_d=1200\text{kgf}$ であったので、安全率としては 5.8 倍程度は確保された。しかし、アーチリブ接合部の弱軸方向剛性を確保する目的のため、鋼板を二重に挿入したため、鋼板一枚に関するドリフトピンの長さ l と直径 d の比が 8 以下となった。そのため、接合部の破壊性状はかなり脆性的であった。更に、最大耐力

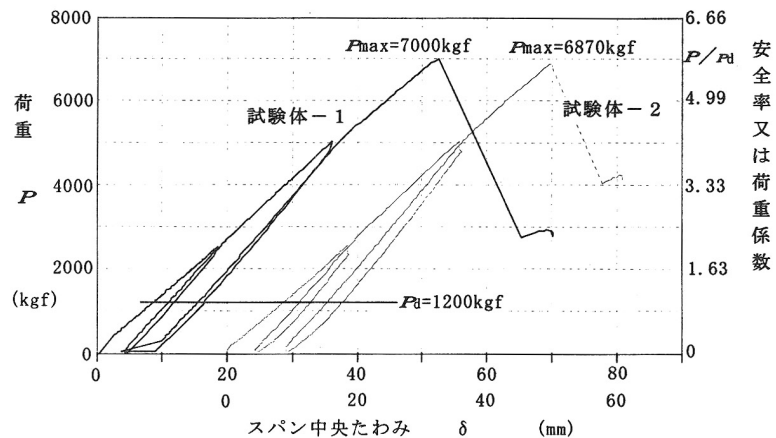


図-1 アーチ接合部試験体の荷重-変形関係

は、いわゆるヨーロッパ型剛塑性理論式で予測される降伏耐力とほぼ一致した。今から考えると、もう少しダクティリティーの大きな接合部としておくべきだったと反省している。

3. 地域材を使った幾つかの集成材林道橋プロジェクト

広田村の木橋完成後、地域産のスギやカラマツ造林木を有効活用した大断面構造用集成材を主桁とする木林道橋の架設プロジェクトに拘わる機会が何例か続いた。計画の段階から、薄木先生を委員長とする検討委員会が設けられる事が多かった。筆者も木材・木構造接合部の専門家という立場から、検討委員会に参加し、なにがしかのお手伝いをする機会に恵まれた。

長野県上松町の「木の棧」（写真-3）、同じく三岳村の「緑橋」（写真-4）、宮崎県小林市の「杉の木橋」（写真-5）、熊本県波野村の「阿蘇望橋」（写真-6）などが思い出深い木橋です。

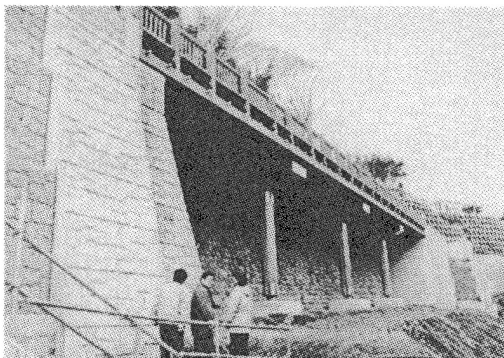


写真-3 木の棧（上松町）

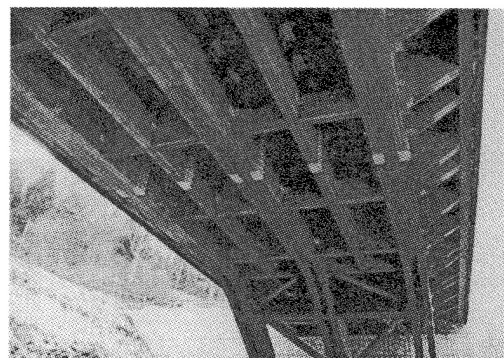


写真-4 緑橋（三岳村）

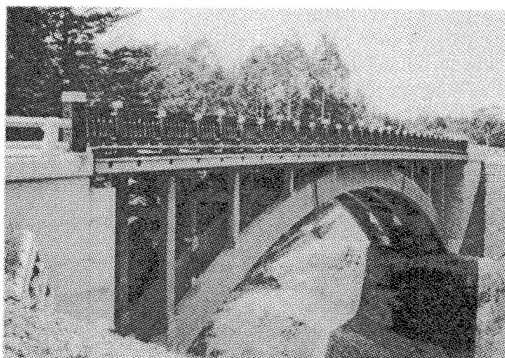


写真-5 杉の木橋（小林市）

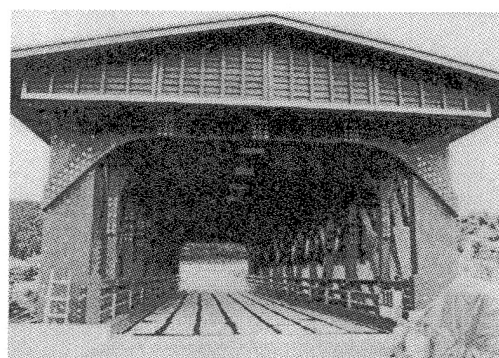


写真-6 阿蘇望橋（波野村）

緑橋で今も気に掛かっていることは、写真-4からも分かるように、接合部の位置がどの桁においても横一線に並び過ぎたなという点である。

杉の木橋は、集成材のアーチ橋として最も均整の取れた美しい橋だなど今も思っている。スパンとアーチの曲率の関係が丁度良かったのだろう。この橋の構造設計を担当された林業土木コンサルタント顧問の池内氏の構造設計に懸ける情熱・パワー、バイタリティーもまた印象深いものであった。

杉の木橋のアーチ剛接合部では、鋼板-集成材間のスリット、並びにボルト穴のガタ等がすべてエポキシ樹脂接着剤で充填された。これは、図-2に示すように、宮崎大学瀬崎先生と山佐木材の共同研究⁴⁾の結果、ボルト接合部の繰返し疲労に対し、エポキシ樹脂の充填効果が著しいことが実験的に明らかとなったことによる。

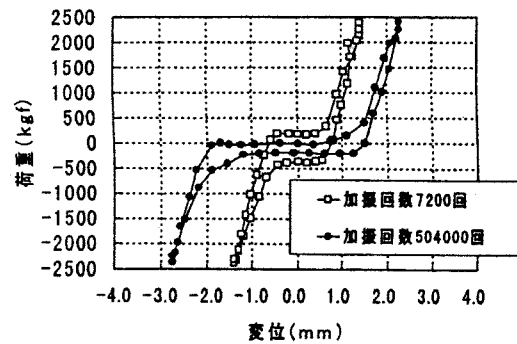
筆者は、事あるごとに「木橋にこそ屋根は必携である」との主張を念仏のごとく唱えてきた。防腐剤を注入することによる物理化学的な防腐処理や、「腐らない(と言われていた)木材」を使うといった方法には、自ずから限界が有る。木橋を30年以上使い続けるためには、屋根を付ける以外著しく効果的な方法はないと確信している。その意味で、阿蘇望橋において、無骨ではあるが(失礼)、完全な屋根付きの集成材林道橋がついに我が国にも誕生した事を大いに喜んだものである。

4. 木製高欄の開発

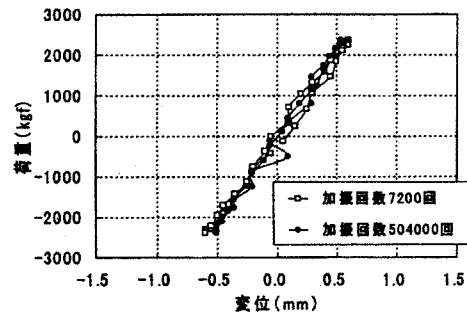
杉の木橋のプロジェクトには間に合わなかったものの、同時期に木製高欄の試作を森林総研の軽部氏と共同で試みたことがあった。図-3に開発した木製高欄の概観を示す。この木製高欄のポイントは以下の通りであった。

- 1) 集成材支柱は最後まで破壊しない断面寸法とする(150x240を想定)。
- 2) 支柱と床板を接合する鋼板添板HTB接合部で大変形を生ずるように設計する。当時の防護柵設置要綱⁵⁾に従って、推力 P に対して、支柱が破壊することなく、 P_{max} 時に $\delta=30\text{cm}$ の変形能力を有すること。
- 3) 支柱は取り替え容易な構造とする。

その項、毎日のように集成材建築構造物のモーメント抵抗接合部の実験を行っていた。柱-梁接合部を別々に機械的接合して、現場で鋼板同士をハイテンションボルトで結合するという施工性の容易な方法であった。



a) エポキシ樹脂を充填しない場合



b) エポキシ樹脂を充填した場合

図-2 動的荷重を受けるボルト接合部の挙動(文献4より)

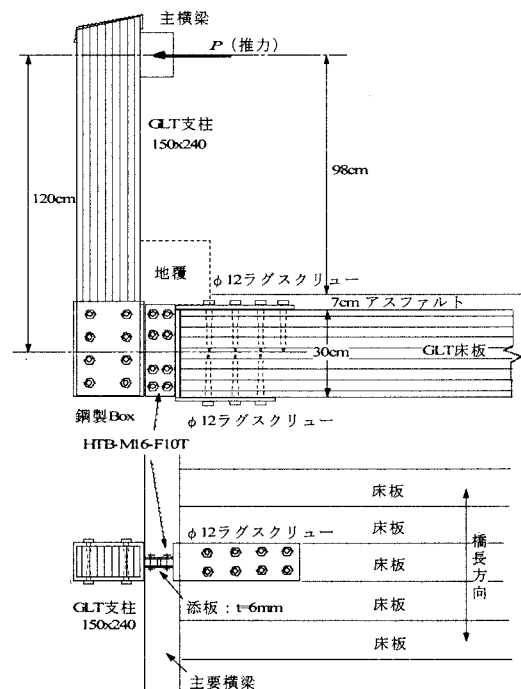


図-3 開発した集成材高欄

実験室で常々観察していた事実は、ハイテンションボルトの摩擦が切れてすべり変形が生じると、接合部の見かけの荷重-変形角関係ループが鋸歯状のエネルギー吸収量の大きい形状を呈するという事であった。高欄の場合、 P_{max} 時に30cm以上の大変形を起こさねばならないという条件を観たとき、直感的にハイテンションボルトですべり変形を先行させるアイデアを思いついた。

図-4に高欄付け根の接合部で終局破壊が起こると仮定した場合の解析モデルを模式的に示す。

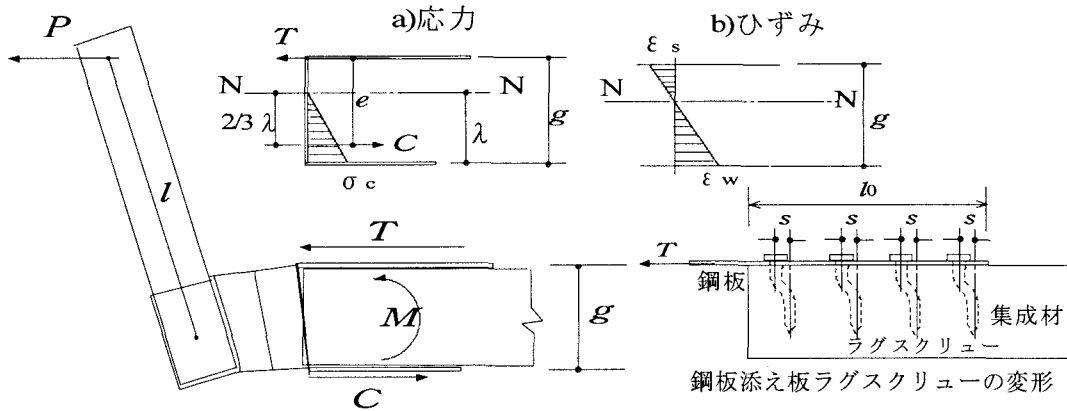


図-4 木製高欄接合部における変形と力の仮定-RCモデルによる解析

集成材の支柱頂部が P なる力を受けると、床板固定部分の「逆コの字型」金物には図-4に示すような力が作用し、回転モーメント $M=Pl$ と釣り合う。この時の引張力 T はラグスクリーが負担し、圧縮力 C は木材の木口面圧応力として負担されると考える。よって、この部分の耐力計算にはRC梁と同様の計算法が使用できる。

床梁側における中立軸の位置 λ は、RC梁の考え方より、(1)式を解いて与えられる。

$$\lambda^2 + 2 \left\{ A_s \left(\frac{E_s}{E_w} \right) \frac{1}{b} \right\} \lambda - 2g \left\{ A \left(\frac{E_s}{E_w} \right) \frac{1}{b} \right\} = 0 \quad (1)$$

ここで、

A_s : 鋼板の断面積

b : 材幅

g : 梁せい

E_s : 鋼板のヤング係数

E_w : 木材のヤング係数

引張側の鋼板は実際に鋼板が伸び変形するのではなく、ラグスクリーのスべり変形が大部分を占めている。そこで、鋼板のヤング係数 E_s の代わりに、ラグスクリーのスべり変形に起因した「見かけのヤング係数」を使う必要がある。長さ l_0 の鋼板に n 本のラグスクリーが打たれた図-4(右下図)のような場合、見かけのヤング係数 E_s は近似的に(2)式で表現できる。

$$E_s = \sum_{i=1}^n K_{si} \left(\frac{l_0}{A_s} \right) \quad (2)$$

(1)、(2)を解くと、中立軸の位置は、

$$\lambda = - \left(\frac{l_0 \sum K_{si}}{bE_w} \right) + \sqrt{\left(\frac{l_0 \sum K_{si}}{bE_w} \right)^2 + 2g \left(\frac{l_0 \sum K_{si}}{bE_w} \right)} \quad (3)$$

ただし、 K_{si} : i 番目ラグスクリーのスべり係数
 l_0 : 添え板鋼板の有効長さ

ラグスクリューの下限95%耐力はその当時の建築学会設計規準の解説文⁶⁾より、

$$p_{0.05} = 2500d^2\rho \quad (4)$$

d : ラグスクリューの直径、 ρ : 木材の比重

一方、我が国のTimber Engineeringの世界では、終局耐力 P_u の3/4を下限95%耐力と見なす慣例があった事を勘案すると、添え板鋼板に作用する終局引張合力 T_{max} は(5)式で推定される。

$$T_{max} = \left(\frac{4n}{3}\right)(2500d^2\rho) \quad (5)$$

中立軸から引張合力 T までの距離を e とすると、図-4より、

$$e = \frac{2}{3}\lambda + (g - \lambda) \quad (6)$$

高欄頂部を押す推力 P と鋼板に作用する引張合力 T との関係より、引張側ラグスクリュー接合部で終局耐力を迎える場合の最大推力 $P_{max-Lag}$ は

$$P_{max-Lag} = \left(\frac{e}{l}\right)T_{max} \quad (7)$$

図-3に示す高欄に関する具体的な数値を代入すると、 $P_{max-Lag}$ は4938kgfと計算された。

一方、図-5に示すハイテンションボルト (HTB) 接合部のすべり発生耐力は、鋼構造のリベット接合部の設計式を適用し、HTBの安全率を1.5と仮定すると、

$$P_{max-HTB} = \left(\frac{1.5}{l}\right) \left(\frac{f_{M16-HTB} \sum_{i=1}^k r_i^2}{r_{max}} \right) = \frac{1.5 \times 6030 \times 639}{120 \times 11.73} = 4106 \text{kgf} \quad (8)$$

以上から、理論的にHTB接合部でのすべりが先行するという推定結果が得られた。

終局耐力推定式が妥当なものであるかどうかの検証実験は、図-5に示す方法で実施した。

供試集成材はエゾ・トドマツ集成材で、接合部の回転中心から120cm離れた点にワイヤーを付け、容量50tonfの電動ジャッキで静的に加力した。試験体は予備試験体1、本番1体であ

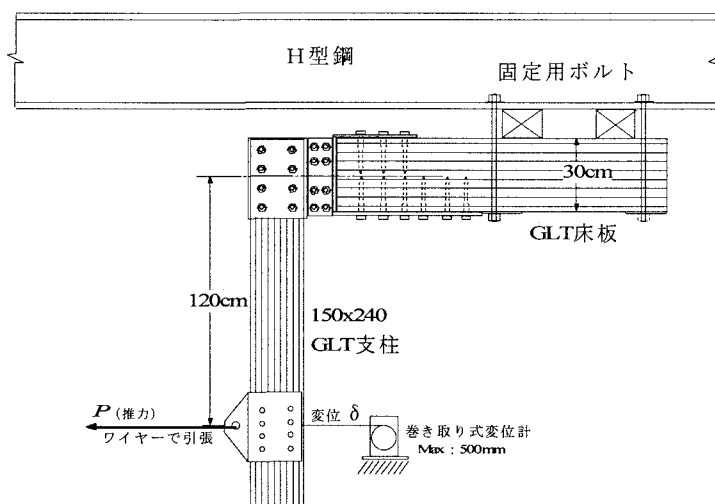


図-5 木製高欄の静的加力実験法

った。図-6に実験結果と推定結果の比較を示す。

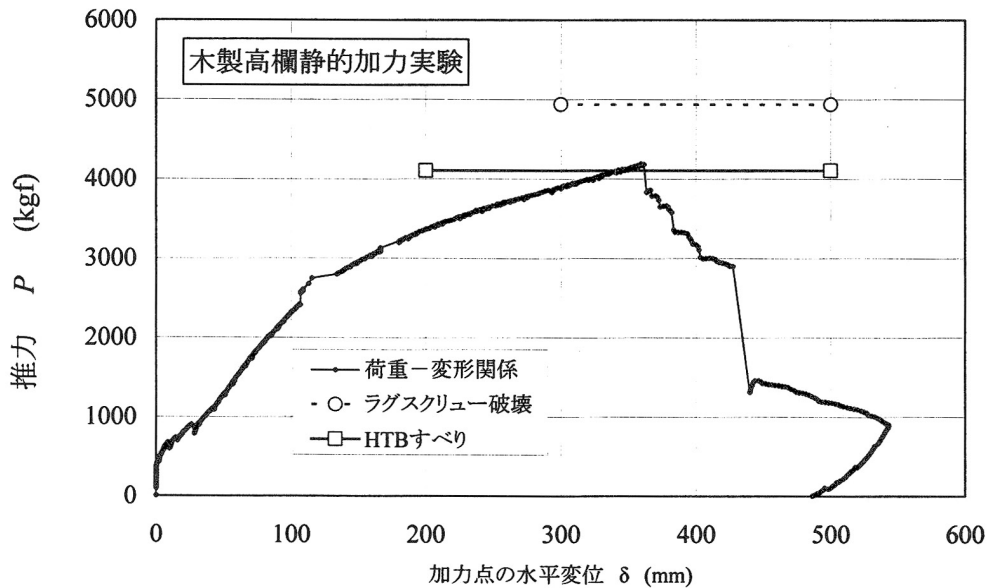


図-6 実験結果と推定結果の比較

試験は1体のみで、再現性に大きな問題は残った。しかし、本高欄形式は、試験的な意味で、鹿児島県の金峰2000年橋（写真-7）、群馬県の大猿橋（写真-8）等の高欄構造に採用され、今後の様子を見ることになった。コスト的には妥当であったように思える



写真-7 金峰2000年橋高欄接合部下面



写真-8 大猿橋高欄接合部下面

5. 木ダボ接合の集成材 π 型ラーメン橋への応用

Timber Engineering 技術の木橋への適用という立場から見て、最も挑戦的かつ今後の動向が注目される技術の一つが「木ダボ接合」であろう。この接合法は古くから家具、木工の分野では当たり前に使われていた手法であった。この在来的な手法に精緻な木材工学の知識を導入し、構造用現場接合法としての信頼性を与えたのが秋田木高研の「木ダボ研究プロジェクトチーム：小泉、佐々木（貴）、Jensen他」の精力的な一連の研究⁷⁾である。開発された木ダボ接合技術を拡張し、ついに25tonf活荷重で設計された π 型林道橋（高知県奥物部紅香橋）の主桁現場接合にも応用されるに至った。

写真-9に高知県の試験機関で実施された木ダボで縦接合された集成材主桁の実大曲げ破壊実験中の様子を示す。梁せいは実大スケールであるが、幅は実際の1/2としている。実験段階では、曲げモーメントを伝達するのに必要な数量のダボが圧縮側と引張側に集中して挿入されていた。

しかし、破壊形態から見て、真ん中のせん断応力を分担する部分にも、ダボを入れておく必要があることが判明したため、実際の主桁接合においては、写真-10に示すように、梁せい方向の断面全体に木ダボが挿入され、ポリウレタン接着剤で現場接合された。

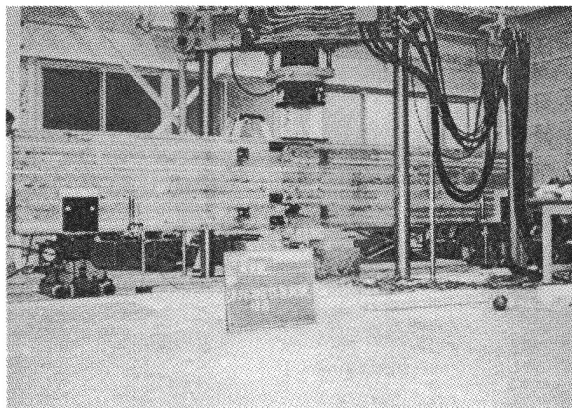


写真-9 木ダボ接合された主桁の曲げ試験

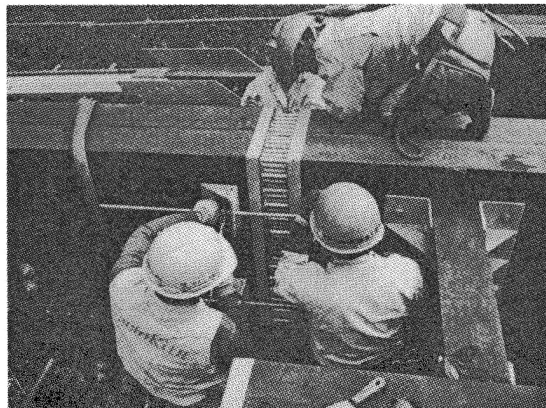


写真-10 木ダボ現場接合状況

6. おわりに

いわゆる近代木橋と呼ばれる集成材を中心とした木橋が世の中に出現してほぼ15年程度が経過した。当初は「今度はどこそこに**橋という木橋が出来たらしい」という情報が詳しく伝わって来て、その都度遠路はるばる見に行ったりしたものであった。しかし、最近では詳細にわたって追跡することも少なくなってきた。良く言えば、近代木橋がある程度定着してきたとも考えられる。

同じ現象が大規模木構造の再興期にもあった。当初は注目すべき木造建築物が完成すると、その都度見学会やセミナーが開催され、研究者が全国から集まったものであった。やがて、この流れは「木構造は研究者から実務家へ」という流れに変わり、今や大型の木造建築物は、構造的には極当たり前に建てられるようになった（火の面での規制は相変わらず厳しい）。

木橋においても、注目される木橋を造る時代から「ニーズ、コスト、環境、安全性、耐久性」等全ての面で地に足の着いた、トータルバランスのとれた木橋を架設する時代へと変わりつつある。

Timber Engineeringの責任と重要性は今後とも変わらないと考えている。

文献

- 1) (財) 日本住宅・木材技術センター；木造化推進標準設計施工マニュアル作成等事業報告書(2)「建造物適用技術推進」、平成2年3月
- 2) (財) 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1月
- 3) 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.
- 4) 村田忠、瀬崎満弘：スギ集成材接合部における動的載荷試験（第1報）—引張圧縮繰り返しによる接合部挙動—、木材科学情報、5(4)、pp.68-69、1998.
- 5) 社) 日本道路協会編 防護柵設置要綱・資料集、p.36 (S61.7)
- 6) 日本建築学会（編）：木質構造設計規準・同解説、p.263、丸善、（第2版）1995.
- 7) たとえば、佐々木貴信、小泉章夫、ヨルゲン・イエンセン、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(1999).