

木橋の耐久性と維持管理

Durability and maintenance of a timber bridge

飯村 豊

IIMURA yutaka

博（農学） 宮崎県木材利用技術センター（〒885-0037 宮崎県都城市花織町 21-2）

ABSTRACT The durability of a timber bridge is largely determined at a design stage, where the design conditions provided by a client are given considerations on the durability and maintenance of the bridge, including its inspection and repair. Then, a particular specification is prepared to describe the performance level and durable period expected of the bridge. The performance level in the specification will be reviewed and replaced with a new one, if necessary, based on initial inspection results. Thereafter, repair or other measures will be undertaken to restore the new level. In this manner, Miyazaki prefecture has been approaching a current construction project of a large-scale timber road bridge.

Keywords : スギ集成材、長大木橋、維持管理、特記仕様書、点検マニュアル
sugi glued laminated timber, large scale timber bridge, maintainance, paticuler specification, inspection manual

1. はじめに

わが国における主に構造用集成材を用いた近代木橋は、20 年前の 1984 年にトリスミ集成材株式会社が奈良県吉野郡黒滝村脇川に、ベイマツ集成材 2 本（長さ 13.6m、断面 180×460mm）を主桁に用いて架設した歩道橋が最初である¹⁾。それ以来、現在に至るまで多くの実績とともに木橋技術も蓄積してきた。

木橋造りの技術的な難しさは、木材という生物資源が建設材料であるだけに材料特性が一様でない点にある。そのため数多くの異なる樹種が持つ材料特性を把握した上で、橋梁用途に要求される品質に適合させるための高度な木材利用技術が求められる。

過去 20 年間に蓄積された木橋技術を含む木材利用技術によって、宮崎県は早生樹・低比重材ともいえる宮崎県産スギを原料とする集成材を用いた橋長 140m、幅員 7.0m の長大車道橋を 2003 年 3 月に完成させ、4 月から供用を開始した。

ここでは、県産スギを利用した長大橋の耐久性と維持管理について研究開発の成果を述べたい。

長大橋を架設する一つの理由としては国産材供給基地として全国第 1 位のスギ素材生産量を誇る宮崎県が、現在の木橋技術を含めた木材利用技術を駆使することによって、木橋への利用に耐えうるスギの強度と耐久性を立証し、スギの需要拡大を図る狙いがある。

スギの強度と耐久性の立証は、設計から原材料の品質管理、加工、製作、架設、維持管理及び修繕に至るまでそれが有機的に関連し合うスギ活用システムを構築することによって長期耐用品質を確保する維持管理を可能にすることによる。

2. 維持管理の位置付け

2.1 橋梁材料としての県産スギ集成材

近代木橋の特徴は、集成材等と一部鋼材によって構成される構造物である点で、力学的条件（構造）と形状（デザイン）が一体となる。木橋は、集成材そのものが屋外に露出するため木材の使用環境が制御できないことが前提となっており、通常の集成材建築物とは集成材の使い方が大きく異なる。

木質材料の耐久特性を大断面集成材と重量鉄骨を例にとり断面減少による劣化を比較してみる。

大断面構造用集成材は県産スギ断面 $300\text{mm} \times 1560\text{mm}$ とし、重量鉄骨を断面 $H-800 \times 300 \times 14 \times 26$ とすることで剛性を等しくした。なおスギ集成材の気乾比重は平均で 0.38、平均年輪幅は 5 mm程度である。大気中に置かれた鋼材の年間平均減厚を $0.06\text{mm}/\text{年}$ ^{2),3)}、スギ集成材の肉やせを $0.1\text{mm}/\text{年}$ ⁴⁾、モミ・ツガを $0.05\text{mm}/\text{年}$ とした⁴⁾。断面減少を除いた正味の断面による断面二次モーメント（断面力）の経年劣化は、図 1 のように表すことができる。

スギが屋外用に 100 年間暴露された場合の肉やせは 10 mm 程度、モミ・ツガの場合は 5 mm 程度となるが、断面力は、スギで 90%、モミ・ツガで 95% が保持される。一方鋼材では、表面が 6 mm 減厚すると、断面力は 43% まで低下することになる。

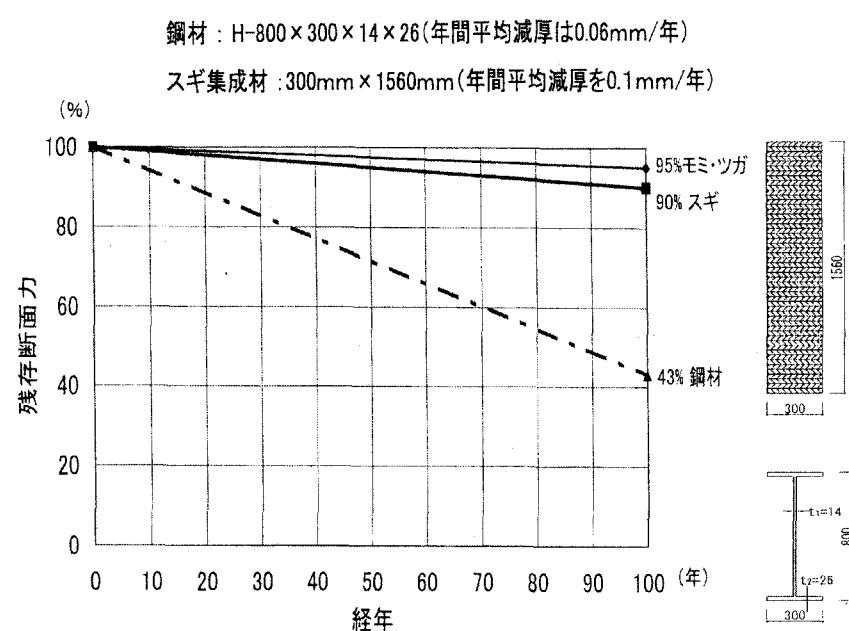


図 1. 経年による残存断面力（断面2次モーメント）⁴⁾

保締力を期待できる接合具の選定、美観上のみで表面やせが考慮されていない埋木やパテ詰め等への注意などが必要となる。

ただ木材の劣化は、鋼材のように表層から内部に進行する以外に木材深部からも劣化する。木材の使用環境の変化により急速な劣化が進むと 10 年も機能維持ができない状態に陥る。この現象を図 1. に加味したのが、図 2 だ。なお、図中でスギ大断面集成材の環境変化による劣化（I）と（II）の境界を示すラインは、耐用年数 60 年で機能維持率 80% を想定している。劣化（II）は設計条件にあらかじめ想定される使用環境の変化がある場合、劣化（I）は設計条件とは異なる環境変化が有る場合である。たとえ大断面集成材であっても、そうした使用環境の変化に応じて対処することが耐久性向上の鍵である。木材は使用環境を整備できれば表層の肉やせだけにとどめ少ないメンテナンスで 100 年以上の断面機能維持も可能な反面、腐朽による急激な劣化も起こりうる材料である。従って、鋼材と異なりこの急激な変化を予防するために点検内容が最も重要になってくる。

構造用集成材がスギなど成長の早い樹種の場合は、春材（早材）の割合が多く年輪幅も広い。その分長期的には肉やせを起こしやすいが、それでも鋼材の減厚速度とは比べものにならない。そのため、集成材構造は 100 年経過後も、大断面材の場合、肉やせ対策による機能回復の必要が殆どないと言え、保守もしやすいといえる。

ただし、肉やせを起こしやすい材料に対しては、集成材表層部が構造上関係しており、防耐火設計法で要求される燃えしろの十分な配慮、将来的にもガタを嫌う接合金物の使い方の工夫、

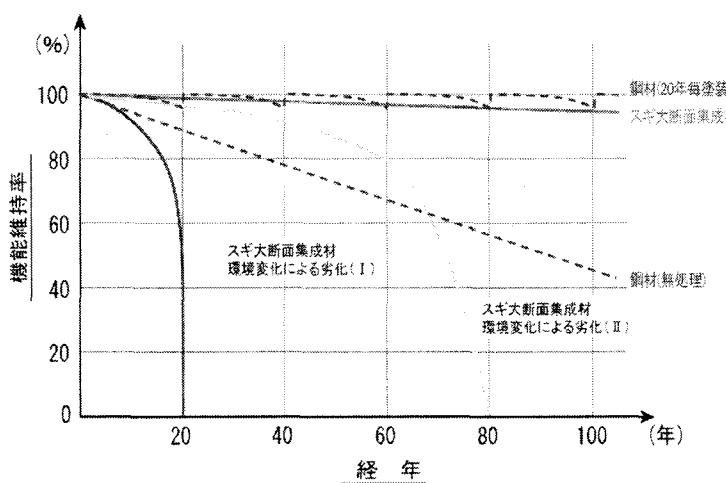


図2. 環境の変化による劣化速度の違いのイメージ図^{4) 5)}

2.2 維持管理の位置付け

ここでは、本橋の維持管理は、図3に示すように「設計条件（性能と維持期間）」、「特記仕様書（劣化外力に対する性能レベルの設定）」、「点検マニュアル（劣化外力に対する抵抗性の検定）」、「修繕（費用対効果を最優先とし、性能レベルの再設定による性能回復）」の4つの要因による相互関係の中で実施されるものと位置付けている。

そのため、「特記仕様書」を設計書の補完として位置付けるのではなく、劣化外力に対する性能レベルを表したものとしている。点検はこの性能レベルに照らしながら建設後の構造物の外力に対する実際の抵抗性を検定するものとする⁵⁾。

従って、ここでの維持管理は管理者の立場に立って考えられており、性能を示す「設計条件」や「特記仕様書」に加え「点検マニュアル」に沿った現場からの情報を管理者が総合判断し、現場に適応できる補修や補強による費用と効果を対比させながら、実質的な施工方法と新たな管理レベルを再設定し、その上で修繕に結びつけられるようになっている。

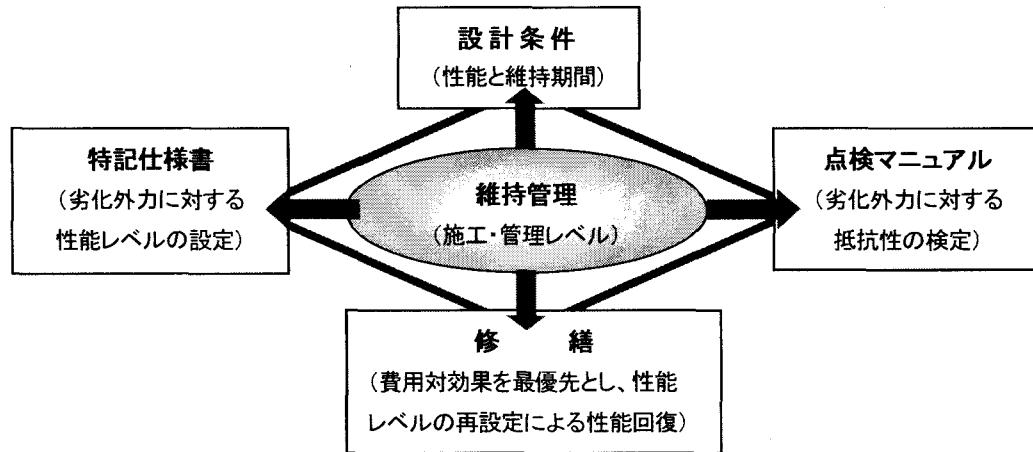


図3. 維持管理の位置付け

3. 設計与条件と設計条件

ここでは図3を具体的に説明していく。まず発注者は、木橋の設計が始まる前に設計与条件を示す必要がある。設計与条件は、橋梁としての各種条件に加えて使用材料の材料特性を示し、目標とする耐用年数を示したものだ。

この設計与条件に対し設計者は、木橋に要求される性能を分析した後、その性能を満たすために木

つまり、スギ大断面集成材を取り巻く環境変化による劣化に即応して、早い段階で対処することが木橋の耐久性を向上させる秘訣といえる。言い換えれば、木橋の維持管理は、肉痩せ程度の断面減少に留めて長期耐用を可能にすることであり、急激な生物劣化に抗しきれずにいると、有効断面激減による急速な機能維持率の低下で木橋の寿命は短命となりかねない。従って、鋼材のみを使用した構造物とは異なったシステムが必要といえる。

材や集成材の持つ物性、力学特性、耐久性などを有機的に総合して設計する最適設計の手法で対応する必要がある。

具体的には、機能維持期間、架設場所の気候や使用環境条件、木材部分の風雨に対する曝され方、接合部での通風性や水の滞留の有無、そしてメンテナンスができる接合であるか否かなどを整理する。ハザード係数の考え方なども参考になる。それが済むと、それらの条件に合った材料、接合法、加工法、架設法、総合的な管理方法などを検討する。その上で保存対策を選定しながら、部位と使用期間の年数を定め、構造面、意匠面、感触など、担保する内容を絞り込んでいく。

より具体的に説明するため米国の木橋の設計体系を簡単に紹介したい。先ず、要求耐用年数を決める。そのためには、設計時に例えば50年後を想定して、何が必要かを検討する。架設場所、規模、形式、予想される利用状況と周辺環境、将来にわたっての木橋の管理体制、維持管理など保守に割り当てられる予算などを総合的に勘案し、設計条件として整理する。この設計与条件に基づき性能設計がはじまる。設計時点で木材の使用環境が想定できることから、部材毎の耐久性を検討することができる。薬剤処理しても50年の耐用が見込めない場合は、木材以外の材料を選定することになる。

こうして各部材を50年仕様に揃え、設計書としてまとめる。木橋管理者と協議して入札されるが、受注予定業者は設計書に示された性能レベルと同等以上を担保する条件で独自の提案を含め50年品質を現場でつくりこんでいくことになる。このように木橋の耐用年数は、耐久性の高い材料を組み合わせたから10年とか30年といえるものではなく、設計によって決まることである。

一方、わが国の木橋づくりは、従来の材料を指定する設計法となっているため、実績がなければ50年耐用の木橋を設計することが難しく、耐用年数を予想することは容易ではない。木橋が完成した後で、様子を見ながら耐用年数を予測することになる。宮崎県の長大橋の場合は米国式の考え方を取り入れている。

4. 特記仕様書

4.1 特記仕様書の重要性

次に、具体的な性能レベルを決めることになる特記仕様書の役割について整理してみたい。ここでは、特記仕様書を設計書の補完として位置付けるのではなく、劣化外力に対する性能レベルを表すものとしている。点検はこの性能レベルに照らして建設後の構造物の外力に対する実際の抵抗性を検定するものとする。

点検は特記仕様書に示された性能レベルを確認することであり、修繕はそのレベルに戻すことに他ならない。従って、設計時点で点検と修繕を含めた維持管理を決定しておくことである。

そうすることで初めて設計与条件に沿った構造物の長期耐用を実現させる維持管理が可能となる。

4.2 特記仕様書の役割

特記仕様書は設計作業が終了する段階で要求性能に対する材料とその性能レベルをまとめたものだ。具体的な性能が第三者にも分かるように、維持管理の観点から正しい使用の条件および物性などの等級を表示する。

参考までに木橋の特記仕様書を以下に示す。木橋に要求される諸性能を満たすためのプロセスを原材料の集成材の強度等級確認から始まり、維持管理に至るまで、全工程を具体的に示したものである。ここでは項目のみを列記するが、これは決まったものではなく、設計時の性能として必要な内容を表記するためのものである。

【木橋上部工架設工事特記仕様書】の項目（例：「かりこぼうず大橋」）

1. 共通事項	2. 原材料	3.1 集成材の許容応力度
1.1 適用範囲	2.1 木 材	3.2 ラミナの防腐処理
1.2 準則図書等	2.2 ラミナ	3.3 構造用集成材の日本農林規格
1.3 変更 疑難発議	2.3 集成材	3.4 集成材の製造
1.4 仕様書の徹底	3. 製 作	4. 防腐処理

4.1 集成材(床版)の防腐処理	8.3 鋼製部品の確認	12.2 現場架設
4.2 集成材の塗装(木材保護塗料)	8.4 墨付け	13. PC鋼奉工
5. 輸送	8.5 断面寸法および形状の調整	13.1 PC鋼奉
5.1 荷造り	8.6 長さ切断	13.2 床版部PC鋼奉作業
5.2 部材の仕分け	8.7 集成材のボルト孔	13.3 プレストレス力の管理
5.3 発送・輸送	8.8 表面仕上げ	13.4 PC鋼奉の張力調整
6. 部材の接合	8.9 集成材の工場塗装	14. 鋼橋の部材精度
6.1 接合金物	8.10 接合金物のボルト孔	14.1 鋼板の部材精度
6.2 ボルトおよびナット	8.11 接合金物の溶接工	14.2 その他の鋼橋の部材精度
6.3 ドリフトピン	8.12 接合金物の工場塗装	15. 大断面集成材の試験
6.4 アンカーボルト	9. 製品検査	15.1 物理試験
6.5 座金	9.1 一般事項	15.2 保守修理試験
6.6 ラグスクリュー	9.2 検査項目	15.3 評議にかかる経費
6.7 釘	9.3 尺寸精度	16. 工事経過の記録
6.8 高力ボルト	10. 運搬と養生	16.1 工事写真
6.9 接合具の先穴	10.1 養生	16.2 品質管理の確認
7. 部材相互の接合	11. 補装	17. メンテナンス
7.1 工場での接合	11.1 路面の舗装	17.1 外観検査
7.2 エポキシ樹脂の充填	11.2 舗装止め	17.2 詳細点検
8. 加工	11.3 アスファルト舗装	17.3 補修方法
8.1 施工図	12. 架橋塗装	
8.2 原寸図	12.1 工場製作	

5. 点検

5.1 点検チェックリスト

点検の第一の目的は、現場からの情報を得ることにある。一般的な木橋の点検マニュアルでは、まず目視点検で全体の外観から著しいわみがないことを確認し、次に主構造部材の腐朽・蟻害、干割れ、接着剥離、床版や高欄を対象とする欠損・磨滅、ぐらつき、さざくれ等の異常などを点検することになる⁶⁾。

木橋の点検の場合、他の材料とは異なる特異な機能劣化を生じることから、主構造部材の腐朽点検に対しては、筆者は表1のようなチェックリストを重視している。重要度の順に挙げると、「排水」、「水抜き」、「防水」、「薬注」、「部材交換」となる。こうした点検は劣化的兆候を発見し健全な機能維持につなげるためである。つまり、表1は将来起こり得る環境変化を予知できる劣化予防チェックリストである。

表1. 木橋の劣化予防の点検チェックリスト⁷⁾

施設名称				橋梁名称		
施工業者				点検年月日		
設置場所				点検者		
区分	対象	材質	点検項目	点検内容	判定	異常の状況
主 構 造	木 橋	ス ギ 集 成 材	排水	水勾配		
				排水路		
				木口水切り		
				排水口		
				毛管浸水		
				通気		
			水抜き	接合具廻り		
				塗膜		
			防水	カバー材		
				シール切れ		
			薬注	表層硬度		
				内部密度		
				有効断面		
			部材交換	接合部欠損		
備考:						

5.2 長大木橋の健全度の点検

長大木橋全体の構造健全度を点検するには、露出した集成材部材の外面の異常に加え深部や接合内部等の隠れた異常を早期に発見する方法と発見された異常の評価が重要である。

例えば、早期発見の方法として、桁のたわみ変形と固有振動数を動態観測によって計測することが有力である。異常の評価は、静的載荷試験や動的荷重による振動試験を通じて得た初期値を参考にしながら、定期的に一定重量の通行車両を走行させた時の実質的な変化量を計測し、その計測値を判断材料とする。

具体的には、たわみ変形はレーザー式変位計を利用して、桁の変位を観測し、固有振動数は、加速度計を利用して、一定条件下での車両通行時の振動を計測する。たわみ変位は橋脚間に糸を張り、これにターゲットを取り付け、橋梁側に固定した変位計で相対変位を観測する。固有振動数は、加速度計で鉛直方向の振動を計測する。

計測値の評価は、例えば、初期剛性が 20% 低下した時の変形量を危険域の基準とする。これは、機能回復限界とも捉えることができる。一般の木橋では、当初の設計段階で構造計算による必要断面の安全率を検討したうえで断面力の余力を最小で 20% 程度見込んでいることによる。

観測データは現場付近に設置したパソコンに無線で伝送され、データは必要に応じてパソコン上で処理される。管理者は架設現場から離れた場所でデータの処理・受信ができる。パソコン上に蓄積された観測データは、一定期間ごとに実施する点検作業時に回収して、危険域を示す基準値と照合することになる⁵⁾。

6. 修繕

6.1 接合部へのエポキシ樹脂充填実験⁸⁾

(1) 実験の目的

添え板鋼板による箱型の接合金物に集成材を挿入し、ボルトで緊結する軸圧縮系接合で、集成材と金物の間の隙間にエポキシ樹脂を注入する効果について調べる。木橋接合部の補修や補強の修繕のための資料とする。

(2) 試験体

集成材の強度等級はE75-F240、断面は210mm×240mm、構成は対称異等級の8プライである。試験体は図4のように製作した。接合具はM24のボルト6本で、先孔の径差は、集成材がプラス3mm、鋼板がプラス1.5mmである。集成材木口とバッケープレートの隙間は5mm、添え板とは2mmである。試験体は6体で、3体はエポキシ樹脂（アイカ製、ジョリーシールJB-3）を注入したAタイプ（A-1～3；図5参照）、及び注入なしのBタイプ（B-1～3）である。

(3) 試験方法

試験はフルスケール 2000kN の実物大圧縮試験機を用い、単調加力で破壊に達するまで加力した。変位は、集成材と鋼材の相対距離を前後 2 箇所測定し、その平均値とした。

(4) 試験の結果

実験結果を表2に示す。集成材の縦圧縮による破壊荷重が最大荷重となり、Aタイプ、Bタイプ共にほぼ同じ値となっている。参考までに設計用ボルトの長期許容せん断耐力 (Pa) から設計基準強度を算出した値を、試験結果を示す図6荷重変位曲線に加えた。

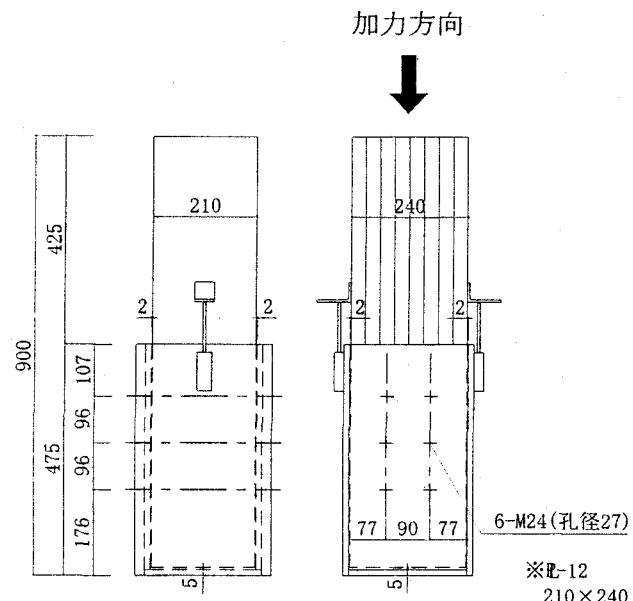


図4. 試験体図

表2.圧縮試験結果(6本当たり)

記号	単位	A-1	A-2	A-3	平均	B-1	B-2	B-3	平均
最大荷重	kN	1,346	1,395	1,430	1,390	1,203	1,357	1,357	1,306
最大荷重時変位量	mm	3.38	2.23	2.66	2.76	13.43	11.41	14.07	12.97
エポキシ樹脂注入		あり	あり	あり		なし	なし	なし	

設計用の長期短期許容せん断耐力(Pa)の算出

ボルト径(D) : 24 mm

主材厚(L) : 210 mm

主材の支圧強度(基準強度)(Fe) : 17.4 N/mm²

ボルトの鋼材の基準強度主材の支圧強度の比(γ) : F/Fe=13.53

接合形式と破壊形式によって定まる係数(C) : MIN(1, d/l*sqrt(8*γ/3)) = 0.6864

ボルト接合の降伏耐力(Py) : Py=C*Fe*d*l=60.2 kN

従って、設計用の長期短期許容せん断耐力(Pa)は、Pa=1/3Py=20.1 kNとなる。

ボルト6本当たりの設計用基準強度は、6×60.2=361.2 (KN)となる。

また、基準強度時点での変位量は、エポキシ樹脂を注入したもので、0.4mm程度、注入していないもので、4.0~7.5mmとなった。エポキシ樹脂を注入していないBタイプは、短期許容耐力まで達した場合、変位量は最大5mmの変位となった。

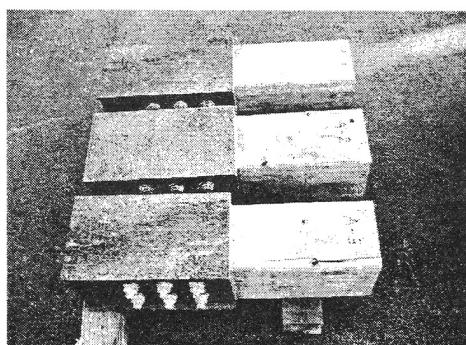


図5. 試験体の写真

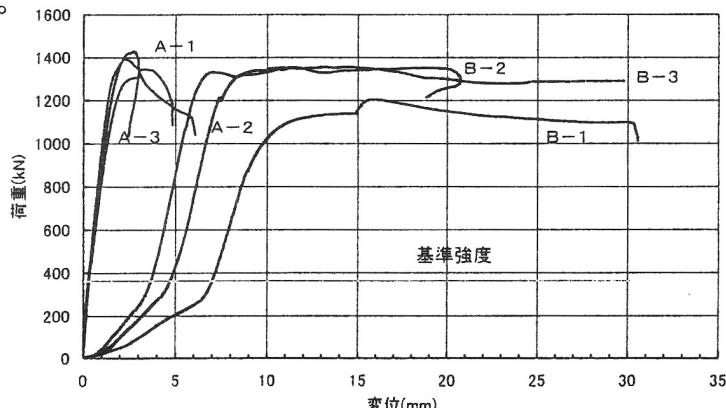


図6. 試験結果の荷重変位曲線

7. 宮崎県林務部森林土木課の木造車道橋「かりこぼうず大橋」への取り組み

7.1 「かりこぼうず大橋」の概要

(1) 道路基本条件⁵⁾

- ・路線名: ふるさと林道小山重線
- ・道路規格: 自動車道1級(第3種4級)
- ・設計速度: V=40 km/h (30 km/h)
- ・山岳部のカットを考慮し設計速度を低減
- ・幅員構成: W=0.75+2.75+2.75+0.75
=7.00m
- ・平面線形: A=32 R=40~R=∞
- ・縦断勾配: 2.50% (↗)
- ・横断勾配: 1.50% (↙) [山形勾配]

(2) 橋梁設計条件⁵⁾

- ・橋長: 140.000m
- ・支間長: 14.30+2@48.20+23.20m

- ・上部工形式: 鋼桁橋+キングポストトラス
- ・下部工形式: 逆T式橋台(A1, A2)
: 円形柱張出し式橋脚(P1, P2, P3)
- ・基礎工形式: 直接基礎(A1, P2, P3, A2)
: 深基礎杭基礎(P1)
- ・斜角: A1 橋台 θ=86° 05' 32"
: P1 橋脚 θ=90° 00' 00"
: P2 橋脚 θ=90° 00' 00"
: P3 橋脚 θ=90° 00' 00"
: A1 橋台 θ=90° 00' 00"
- ・設計活荷重: A活荷重
- ・添加物: なし
- ・支承: タイプB

7.2 設計施工管理検討委員会と建設技術委員会

宮崎県は1997年、小林市にスギ集成材の上路式アーチ車道橋「杉の木橋」(材橋長38.6m、幅員7.0m)を架設した実績がある。しかし、今回架設した総重量840t重のスギ長大木橋となると強度と耐久性はより一層重要な課題となる。そのため設計段階で設計施工管理検討委員会を組織し、施工段階では建設技術委員会を設置して、新たに生じる課題の解決をはかってきた。特に、建設技術委員会は、長大木橋の維持管理を容易にすることに主眼を置いた。

(1) 設計施工管理検討委員会⁵⁾

長大橋の設計に当たり、日本では木造車道橋の歴史が浅いことから近代的な木橋の設計施工基準がなく、設計ノウハウが十分でないため、専門家の意見を設計に反映させる目的で組織された。

(2)建設技術委員会⁵⁾

「かりこぼうず大橋」の維持管理マニュアル作成を目的に設置された。マニュアル作成に際しては、維持管理を適切に行うため、部材製作から現場施工に至るまで下記の項目が維持管理の面から再検討された。

- | | |
|----------------------|----------------|
| ①維持管理の視点から見た規格、製造、性能 | ④劣化対応 |
| ②橋梁構造としての木材加工 | ⑤実験及び観測機器 |
| ③木造橋としての架設、施工 | ⑥その他目的達成に必要な事項 |

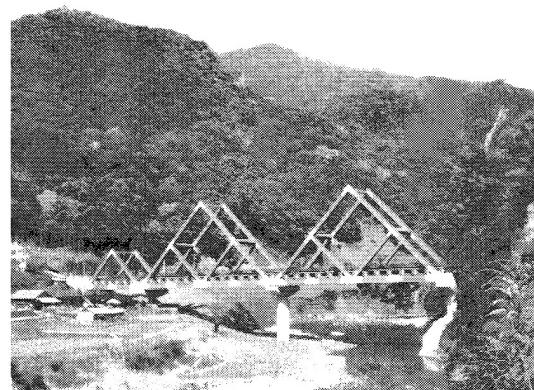


図7. かりこぼうず大橋の完成写真

8. おわりに

こうした一連の委員会活動と建設事業を通じて、スギ材料を橋梁材料として選定法や加工法について見直すとともに、現場で架設しやすい橋梁部材の製作について再検討を重ねた結果、関係者の間に木橋に対する理解が深まり、新たなスギ利用技術の構築へと糸口が開かれていった。維持管理はこうした活動の延長ともいえ、耐久性の向上に直接結び付くものと考えている。

謝辞

本報は「かりこぼうず大橋」建設技術委員会の委員の方々をはじめ多くの関係者の協力により可能となりましたこと、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) トリスミ集成材株式会社編：「集成材建築物実績表」,2002,p.1.
- 2) (財)日本住宅・木材技術センター編：大規模木造建築物の保守管理マニュアル,1997,p.228.
- 3) (社)日本建築学会編：鉄骨工事技術指針・工場製作編,1996,p.525.
- 4) 飯村豊,中西幸一,岩崎新二,東口清耕：集成材構造の保守に関する研究,第9回日本木材学会九州支部大会講演集,2002,pp.61-62.
- 5) 宮崎県林務部森林土木課,かりこぼうず大橋建設技術委員会：県産スギを利用した長大橋「かりこぼうず大橋」,平成15年度全国木橋技術研修会,(5),2003.
- 6) 木橋技術協会編：“点検マニュアル”,(6),1999,pp.1-21.
- 7) 飯村豊：現代木造の耐久設計,2002年度秋期合同研究会「木造建築物の耐久設計を考える」,日本木材学会生物劣化研究会・日本木材学会木材強度・木質構造研究会,(12),2002,pp.10-19.
- 8) 飯村豊,荒武志朗,田中洋,間瀬英男：集成材接合部の引張り・圧縮実験—エポキシ樹脂注入の効果の確認—,「かりこぼうず大橋」建設技術委員会,(9),2002