

2002 年度秋期合同研究会

「木材建築物の耐久設計を考える」

2002年12月13～14日

(広島市)

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

2002年度秋期合同研究会

主催：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
共催：広島県木材加工技術協議会，(社)日本木材保存協会
後援：(社)日本木材加工技術協会
日時：平成14年 12月13日(金)～12月14日(土)
会場：鯉城会館（広島市中区大手町1丁目5-3）

プログラム

(第1日目) 12月13日(金) 会場：鯉城会館
12:00～13:00 受付
13:00～17:00 講演会・討論会
17:30～19:30 懇親会 会場：鯉城会館城会館

講演会「木造建造物の耐久設計を考える」

(1)「古木造建造物の耐久設計と課題」

文化財建造物保存技術協会 高品 正行 氏

(2)「現代木造の耐久設計」

宮崎県木材利用技術センター 飯村 豊 氏

(3)「なぜ錦帯橋は50年もったか」

－錦帯橋の雨仕舞と老朽化－

早稲田大学名誉教授 神山 幸弘 氏

討論会

司会：秋田県立大学木材高度加工研究所 土居 修一 氏

(第2日目) 12月14日(土)

9:00～14:00 見学会

見学会 錦帯橋『平成の掛け替え工事』

(錦帯橋までバスで移動，見学後岩国と広島で解散)

目 次

- (1) 「古木造建造物の耐久設計と課題」
文化財建造物保存技術協会 高品 正行 1
- (2) 「現代木造の耐久設計」
宮崎県木材利用技術センター 飯村 豊 10
- (3) 「なぜ錦帯橋は50年もったか」 — 錦帯橋の雨仕舞と老朽化 —
早稲田大学名誉教授 神山 幸弘 20

1. はじめに

一般的に木造の古建築というと、百年以上、ましては文化財に指定されているとなると法隆寺金堂 1200 年以上という遺構がある。住宅にしても数百年単位である。

現代構法での住宅木造建築の平均耐用年数が、物理的に 50 年程と比較すると数十倍もの耐久性がある。しかし、そこには建物の建つ文化的価値・環境、材料、工法、維持修理などによって、耐久年数は、変わってくる。我々、文化財建造物保存修理技術者仲間内では、耐久設計という言葉は、殆ど使わない。建造物の修理ということは最低でも 100～150 年は根本的修理をしなくてもいいように、という前提で材料や工法を考えて修理しているからかもしれない。社寺建物となると 300 年位は、根本的な修理をしなくてもいいようにしたいと考えている。基本的に全てに置いて耐久設計を前提にしているので、あえて耐久設計という言葉を使わないのかもしれない。文化財建造物の場合は腐朽、劣化している材料でも、部材の価値を考慮して、何らかの耐久処理をして、再用する。腐朽、劣化した材料は取替えた方が建造物全体の事を考えれば当然耐久性が維持できるが、文化財的にはその劣化した材料そのものに価値があるので、あえて再用する。そこが一般的な、修理と大きく違うことになる。今回は、文化財保存修理で、どのような手順で、耐久設計の方針を立て実施しているか、いくつかの実例を紹介する。又、伝統的な木造建造物の中から耐久設計と考えられるいくつかの知見を紹介し、木造文化財建造物耐久設計の課題も考えてみたい。

2. 古木造建築の耐久性設計への手順（文化財保存修理の場合）

(1) 破損調査（主として木部について）

耐久設計をする前に、必要な情報として保存修理する建造物の現状などの破損状況を調査する必要がある。まずは目視により、外観、軸部、軒、小屋裏、天井裏、床廻り等を一通り調査し、破損状況を調べる。

各部の破損内容を総合的に判断して、修理方針を策定する。

- ①解体修理 …全ての部材を一旦解体する。
- ②半解体修理…屋根、小屋組、軒廻り、床廻り等を解体、軸部は残る。
- ③部分修理 …屋根の一部、軒の一部、縁廻りの一部などの修理

(2) 破損調査の方法

- ・目視 外部から腐朽・劣化剥離
- ・計測 沈下、不陸、傾斜、垂下、曲がりなどの数値の計測、
- ・打音・突刺し、木材の腐朽深度を判定
- ・科学的手法、超音波、X線撮影、遮光ランプ

(注) 破損の移行経路を調査する。

(瓦の移動→雨漏り→野地の腐朽→小屋材の腐朽→天井の破損→畳の腐朽)

①材料の破損

- 腐 朽
 - ・木材 外見上の破損 破損範囲を確認する。
表面腐朽→強度に影響しない。
 - 芯の破損 腐朽、割裂の深度を確認する。
品位（白太・陽疾など）影響が大きい。

- 虫 害
 - ・虫の種類
 - ・現在棲息して活動中か、過去の食痕かを見分ける。
 - ・食害の深度を調べる。再用、不再用の決定。

②破損度の留意点

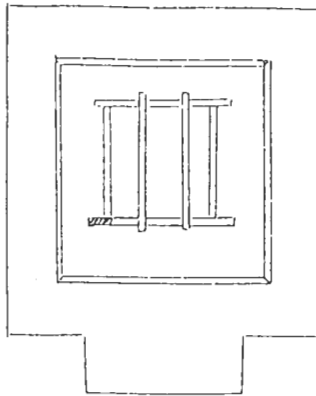
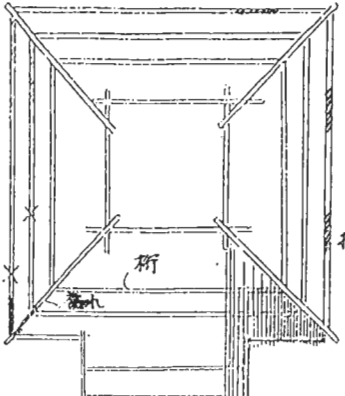
- 総合的の破損
 - ・沈下（不同沈下）
 - ・傾斜
 - ・弛緩

③建物各部の破損

- 基 礎
 - ・地盤の変動
 - ・礎石・束石・地覆石・敷石・雨落石・などの不同沈下、移動、
 - ・基壇石積の沈下・移動・傾斜等
 - ・石材の割れ、凍害、風化、劣化等
- 木 部
 - ・軸部の不陸、傾斜垂下、傾斜、撓み
 - ・経年による結合部の弛緩、垂下、狂い、捻れ
 - ・強度不足などの構造欠陥による破損
 - ・木材の腐朽、折損、割れ、虫害等
- 屋 根
 - ・雨漏り、野地、軒廻りの破損、垂下による屋根面の不陸、葺材の移動と破損（割れ・穴・ハゼ切れ、錆び等）
 - ・葺材料の耐用年限による腐朽・損耗、凍害（撥水性の低下）と割れ
 - ・災害 台風による葺材の飛散、落下、落下物による破損
積雪により葺材の落下、棟の崩壊
落ち葉、木枝などの堆積による腐朽・破損
- 壁
 - ・上塗表面の亀裂、剥落、汚染、
 - ・下地などの亀裂、剥落、崩壊
- 建 具
 - ・使用に伴う摩滅、弛緩
 - ・部材の折損、狂い、収縮、割れ、破れ
 - ・使用場所の変更に伴う切断・嵩上げ
- 塗 装
 - ・上塗面の退色、剥落、風化、劣化、汚染
 - ・下地からの剥落、割れ
- 金属材
 - ・部分の欠失、亀裂、発錆、摩耗、疲労

(3) 調査の記録（カルテ）

- 各調査種別毎の部位を示す見取図の野帳を作成する。
- 測定数値の他に、状態観察と所見も記録する。

破 6 小屋組 (梁 拵枕)		破 9 軒廻り (檼 芽負)	
			
原因	雨洩れによる腐蝕	原因	雨水の浸入による腐蝕
所見		所見	

(4) 破損調査の把握と修理設計 (耐久設計) への反映

- ・破損度の把握 破損程度 範囲・寸法・法量
- 破損原因 必ずつきとめること
- 対策 最も効果的な修理方針
- 材料の再用可能な限度と方法 (繕い、補強、保存処理、取替)

(注) 国宝、重要文化財等の建造物は文化庁の承認が必要で、現場担当者の考えだけでは、決定できない場合がある。

(5) 解体範囲の決定

- ① 工事着手前の破損状況の調査によって、修理を行う範囲を策定する。
この場合、修理を行う必要な範囲の解体計画をたてる。
- ② 工事に着手後、破損状況の範囲を精査し、実施の解体範囲を定める。
この場合、破損による材料の取替え、また解体しないで材の入れ替えの可否、或いは補強などで取り替えしない方法などを検討して最良方針を選択する。

(6) 再用、取替えの決定

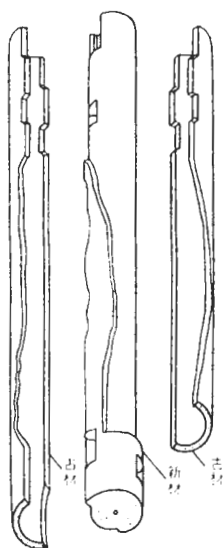
- ① 文化財としての価値を構成する部材の保存を留意する。特に建立時の部材、化粧部材で、彫刻や曲線材など資料価値の高いもの。
 - ・必要な保存・補強方法の対策
- ① 防虫・防蟻の処理
- ② 仕様を変更して保存をする方法もある。
- ③ 補強の処理
 - ・構造的な欠損原因による破損
 - ・構造材の耐力低下による破損
 - ・単材の耐力低下による破損
 - ・補修で補強を必要とする場合

3. 保存修理の繕いの例

文化財保存修理の場合、建造物の耐久性と材料の保存性の両方を考慮しなければならない。材料には、歴史的な痕が刻み込まれている。色々な痕跡、墨書、加工痕を含めた生産業の社会背景が込められていて、現代の我々では汲み取れない技術史、芸術史などの一級の資料なるものもあり、単純に耐久性や、経済的な効率だけで、材料・工法を替えるわけにはいかない。いかに、大事な情報源を持っている部材を本来あるべき位置で、保存されることが重要である。部材の半分以上、腐朽、蟻害にあっていれば取替える場合があるが、そうでなければ極力「繕って」使われていた部位で残すことが、保存修理の基本的考え方である。ここで過去及び最近に施工された例を紹介する。



身舎柱足元の腐朽状況



重要文化財旧燈明寺本堂
保存修理工事報告書より

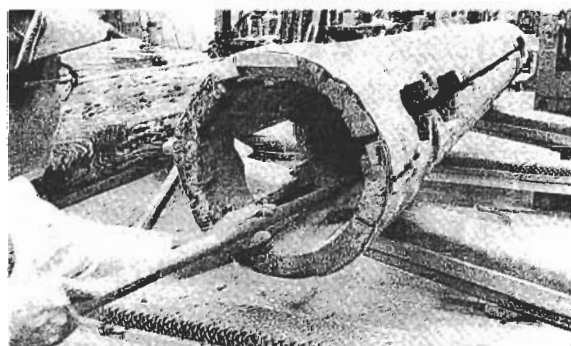


図 柱上部剥抜き作業
「に五柱」の上部腐朽部を削り出しているところ。

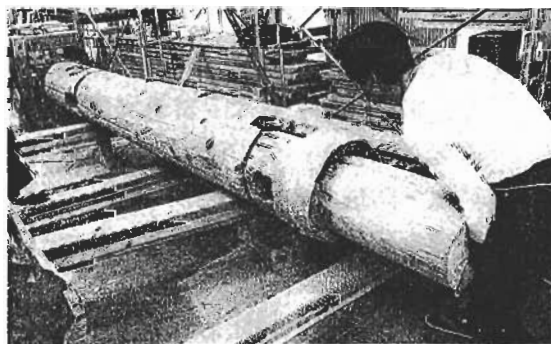
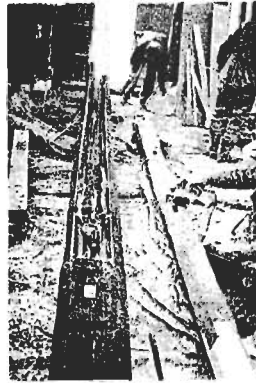
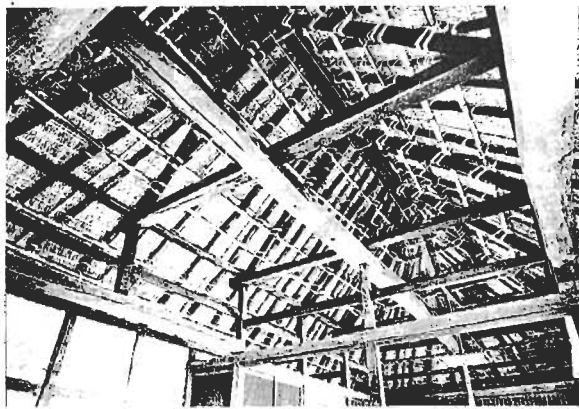


図 柱上部木材挿入作業
深さ2尺3寸まで、直径1尺1寸の木材を挿入し、納を造り出した。

重要文化財波宇志別神社社楽殿保存修理工事報告書より

小屋梁の補強例 I

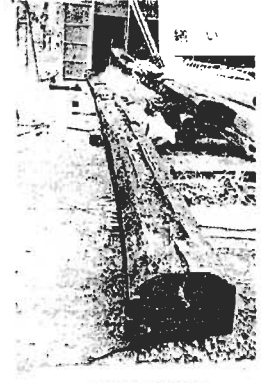
重要文化財旧小采家住宅 保存修理報告書(徳島県東祖谷山村)より



c. 蟻害部分撤出



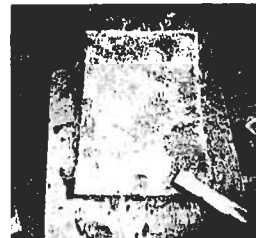
b. 白蟻により粉化している



a. 牛梁上端切開



e. FRP処理



f. FRPを内張



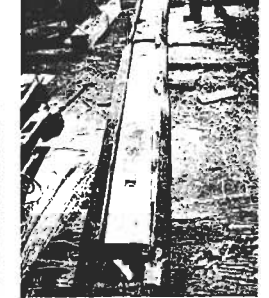
d. 牛梁元口部繕い



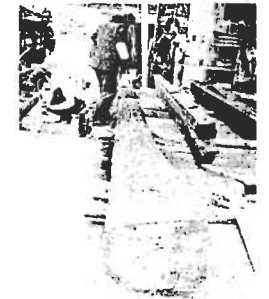
i. 同右



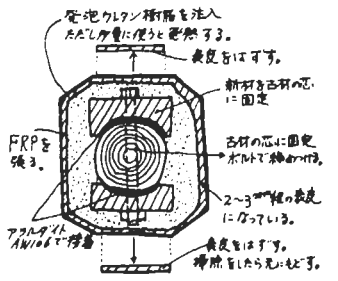
h. 発砲ウレタン注入



g. 古い芯に新材補強

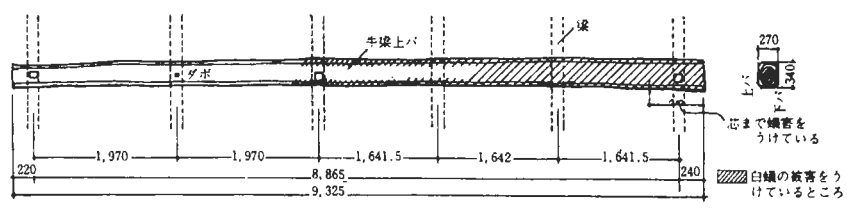
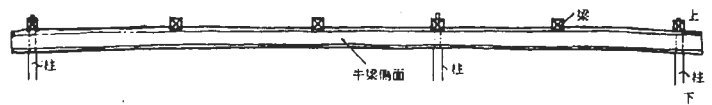


j. 古表皮接着古色処理



古材の芯と強度が使える場合

挿図49 牛梁化学処理断面図



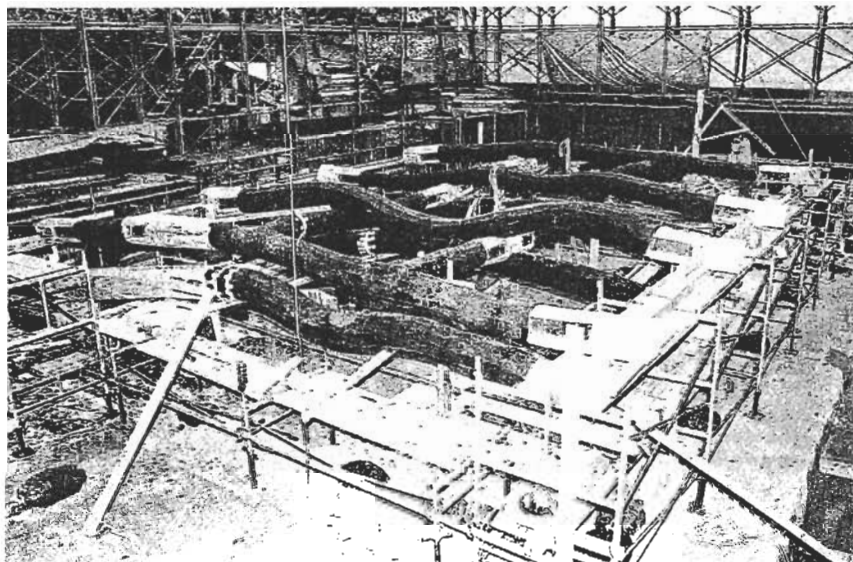
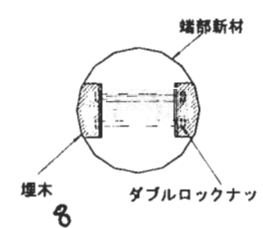
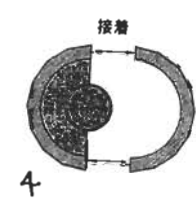
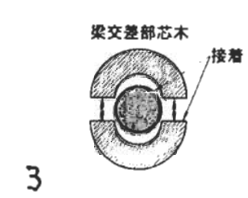
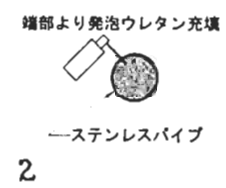
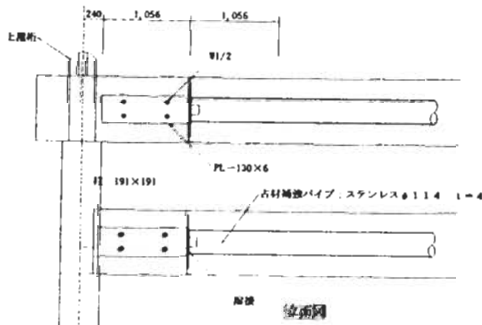
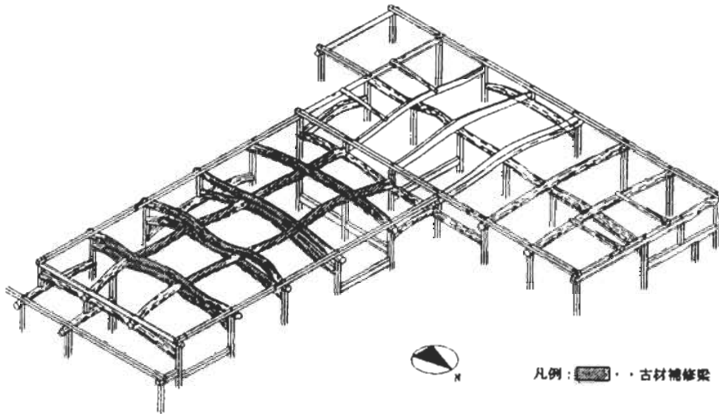
挿図50 牛梁(中引梁)腐朽図(単位mm)

小屋梁の補強例 Ⅱ

重要文化財横大路家住宅 文化財建造物保存事業主任技術者研修会 第16号より

Ⅲ 古材（小屋梁）補修計画

当横大路家住宅の小屋材は松を使用しており、ほとんどの材が蟻害を受けていた。通常であれば取り替えが必要と考えられるが、古材の残存率が極めて低いため補強により再用することとした。

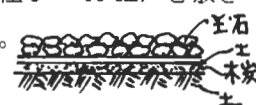


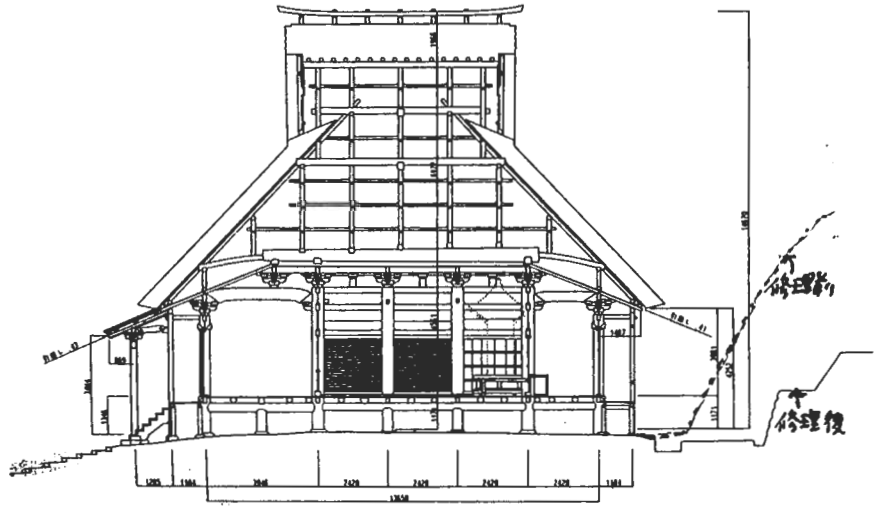
小屋梁の仮組状況

4. 古木建造物から学ぶ耐久設計の知見

(1) 古木建造物の中から、耐久設計を考えていると思われる例をあげる。

床廻り

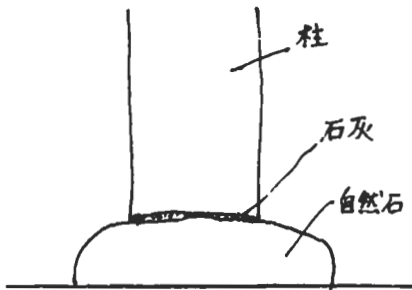
- ・床高が高く、風通しが良いほど
蟻害や、腐朽が少ない。
- ・床下の地盤が、乾燥している
岩盤の上に建っているような
ところは、腐朽が少ない。
- ・床下に湿気がある場合、木炭を
敷き、土を覆い、その上に花崗
岩の玉石（径5～10 cm）を敷き
つめていた。
玉石
土
木炭
土
- 玉石が下からの湿気を結露させ
て、床上に湿気が上がるのを防
いでいるものと思われる。
- ・床下の地盤は、古代は版築をして
いて、地盤を強化して、不同沈下や、
耐震性が強まる。



福井県小浜市 飯盛寺本堂

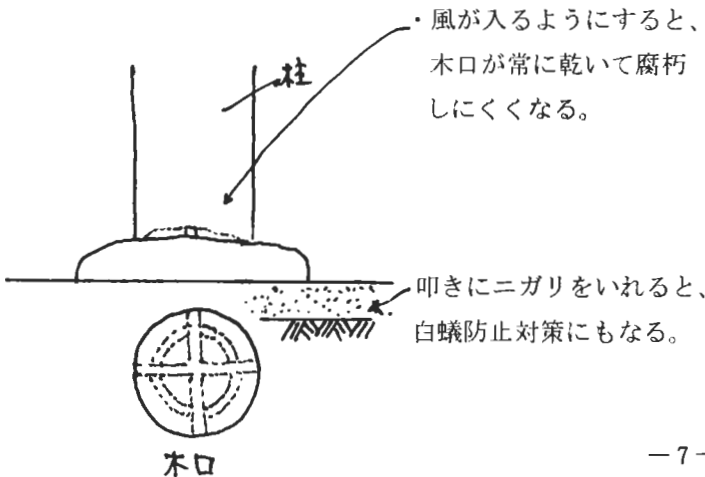
建立年代延徳元年（1489）

- ・本堂内陣の床板は建立後一度も解体されずに
残っていた。（500年以上）。理由として。
床高が 1.2 m程あることと、地盤が蟻地獄が
できる程乾燥していた。又、500年前に焼け
て残った木炭層があった。



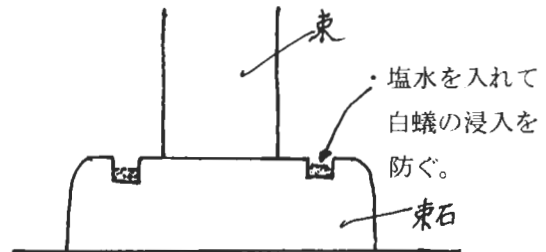
- ・石の結露と木口接触面の腐朽防止として、石灰を石の上
に敷いて（5～6 mm）結露を防いでいた。

福井県小浜市 飯盛寺本堂 建立年代延徳元年（1489）



- ・風が入るようにすると、
木口が常に乾いて腐朽
しにくくなる。

叩きにニガリをいれると、
白蟻防止対策にもなる。



- ・塩水を入れて
白蟻の浸入を
防ぐ。

・正八幡宮拝殿（山口県秋穂町）

(2) 木についての耐久設計について

・木の伐採時期

木の種類によるが、水の吸い上げが少ない時期（9月下旬から12月末頃）松は時期が悪いと虫がつきやすい。1月以降は青カビが発生する。特に旧暦の※『八専』には切るべきではないと言われている。

※暦で『八専』は雨が多いされている。俗信であるが、きこりは『八専』には木を切ってはならないとされている。

・葉枯し材が良い、切ってから、葉を残したまま2ヶ月程置いておくと、養分が葉の方に行き乾燥が早く、虫害・カビの発生がしにくく、木の発色が良くなる。

・竹の切時期は特に秋切りにしないと虫が入る。（新月が良い、八専は切ってはならない。）新月に切るとは、地球と月の引力の関係で、特に水が少ないということなのか、昔の伝承を調査する必要がある。

・主要部材は、心材（赤味材）を使う。辺材（白太材）は、殆ど虫害がみられる。

・心材でも200年以上のものに、泥蜂によって、穴があげられているものが見られる。

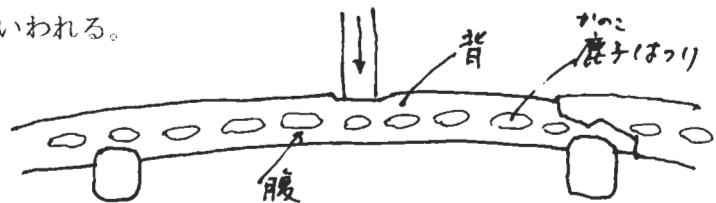
・定光寺観音堂（愛媛県弓削町）では軸部材に塩木を使用していた。

塩木とは、浜に木を半年ほど埋めて、塩漬けにする。虫害、腐朽に対して効果があるとされる。（弓削島の古老の話より）

・韓国の海印寺に保存されている国宝「高麗八萬大藏経板」の版木は、白樺の木を潮水に3年間漬けてから塩水の釜で蒸し、蔭干しにしてから版木にした。これは亀裂防止と防虫効果があると考えられる。

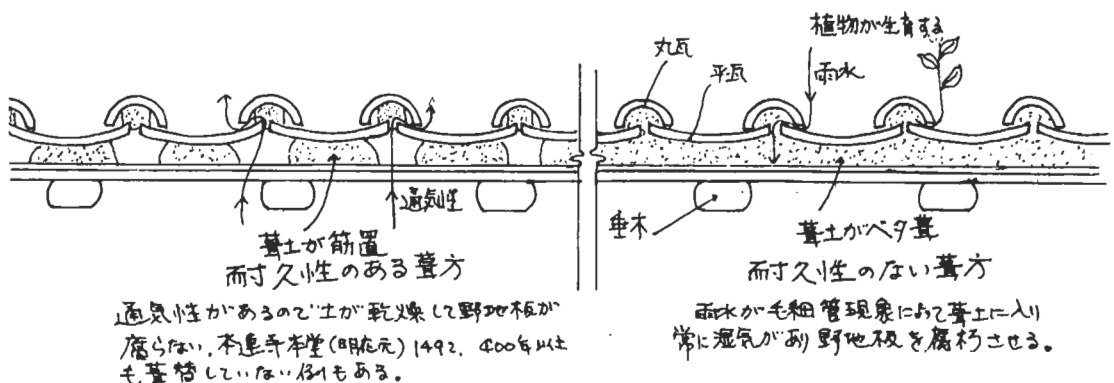
・木の使い方によって耐久性を保つ

小屋梁には、背を上に使えば曲げ力に対して有効である。表面加工に鹿子（かのこ）削りをする。虫が出るといわれる。



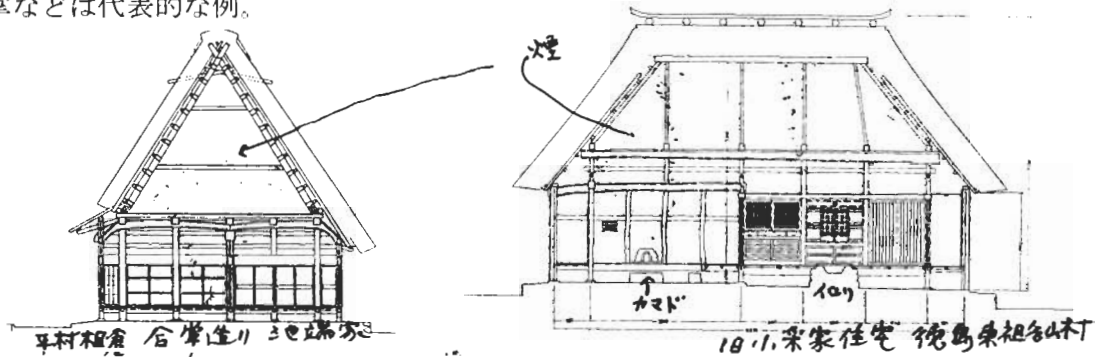
(3) 屋根耐久設計の例

瓦葺では、機密性がなく、通気性のある方が耐久上よい。仮に雨水が入ったとしても、乾燥しやすい環境を造ることが大事である。



茅葺

- ・イロリの煙が木部や、茅に煙がコーティングされて、乾燥と防虫・防腐効果がある。
白川郷の合掌などは代表的な例。



5. おわりに

古木造建造物の耐久設計という与えられた課題は、当初、「古木造建築から学ぶ耐久設計」ということであったが、筆者が誰かにお教えてほしいテーマ内容であって、とても書ける知見も持っていないし能力もない、と判断して通常実践している文化財保存修理での耐久設計に至る手順と

実例を紹介することとしたが、やはり「古木造建築から学ぶ耐久設計」という魅力的なテーマは頭から離れず、筆者の少ない知見と断片的でまとまったものではないが、この機会に紹介することとした。今後、更に情報を集め、整理発表したいと考えている。さて、日本の文化財木造建造物の保存修理は、世界的に高く評価されている。しかし、木造修理に関しては、まだまだ、木の特性を生かした、保存ができる可能性があると思われる。防蟻防腐の薬剤、化学的な接着剤や含浸強化剤、金属に頼る補強など現在はしているが、化学的な素材使用による環境汚染やシックハウス等を考えると、文化財保存修理の現場も環境問題を考慮した素材で、修理をしなくてはならなくなる。木の補強としての含浸剤も人体無害な天然素材で注入しなければならなくなるであろう。木の特性を生かした天然素材の含浸剤や接着剤が開発されることを夢見ている。それは、急速に失われつつある伝統的な木造建造物の材料、技法、工法の中に、ヒントが秘められている。それをいかに現代的な科学、工学等で解明と応用が出来るかが、課題だと思われる。

参考文献

- 「破損調査」文化財建造物養生研修資料、(財)文化財建造物保存技術協会編集
- 「施工」1994年、No.340 「保存再生」まるごと大百科、彰国社
- 「重要文化財旧燈明寺本堂保存修理工事報告書」(神奈川県)昭和61年刊行、
(財)文化財建造物保存技術協会編集
- 「重要文化財波宇志別神社神楽殿保存修理工事報告書」(秋田県)平成5年刊行、
(財)文化財建造物保存技術協会編集
- 「重要文化小采家住宅保存修理工事報告書」(徳島県)昭和58年刊行、
(財)文化財建造物保存技術協会編集
- 「重要文化財飯盛寺本堂保存修理工事報告書」(三重県)平成10年刊行、
(財)文化財建造物保存技術協会編集
- 「伽倻山海印寺」韓国1977年刊行
- 「文化財建造物保存事業主任技術者研修会」第16号平成14年度、
(財)文化財建造物保存技術協会発行

現代木造の耐久設計

宮崎県木材利用技術センター

飯村 豊

はじめに

国土交通省は平成14年9月4日付で「長寿命木造住宅整備指針」を発表した。これを受けて各都道府県でも「地域長寿命木造住宅推進計画」を策定し、60年以上の使用に耐えうる長寿命住宅の推進を目的に、物理的および社会的な耐久性の向上を図ろうとしている。国土交通省の指針は住宅を対象にしているとはいえ、その影響は木造全般に及ぶと予想される。木造の耐久性に関する研究の上でも木造の今後の方向性を示す指針として参考になろう。

この指針の中で筆者が特に着目したのは以下の内容である。

- ・物理的長期耐用性の確保に配慮した材料の選定
- ・耐用年数の異なる部品・部材同士の独立・分離、部材の寸法・規格の統一
- ・地域の風土の文脈と調和した工法等の採用
- ・住まい手の意識の啓発

本文では上記の指針を踏まえ、木橋などの用途に見られる集成材構造の耐久性能を向上させる技術開発に取り組んできた経験や研究開発成果を、1. わが国の材料選定の現状、2. 耐久性能向上技術の事例、3. 相対的に決まる耐久性能、4. 特記仕様書の重要性、の順に以下に要点をまとめてみた。

1. わが国の材料選定の現状

(1) 材料選定の難しさ

材料選定について最近考えさせられた報道がある。東京電力に続き中部電力や東北電力の原子力発電所で見つかった「材料の早期劣化が原因」と思われる機器・配管のひび割れの問題である。2002年9月23日付けの日本経済新聞によれば運用中の原発の材料には「新品並みに無傷なこと」を求め、安全基準は新設時を想定して作られているという。現在の定期検査や自主点検では、炉心隔壁や再循環系配管など同一部分を10年に一度の頻度で点検することとしているが、重要な炉心隔壁などの交換は多額の費用と手間がかかるため、施設側では交換は一回が限度としており、材料が予想

以上に早く劣化すれば、長寿命は根底から崩れると報じている。高性能施設の材料選定の難しさを示す記事であり、性能維持という点では現代木造も今後は同様な難しさを抱えることになろう。こうした問題を解決する一つの方法が耐久設計ではないかと考えている。

(2) 建築工事共通仕様書による材料選定

築後35年を経過した集成材建築物の改修工事の実例から材料選定と耐久性について現状を考えてみたい。

宮崎県都城市梅北児童館は、1966年に同市営繕課が営繕協会編の昭和36年版(1961年版)「建築工事共通仕様書」¹⁾に従い材料選定などを含めて設計した公共施設で、地元業者によって建設された。平屋建て延べ床面積213.84m²の建物は2001年に改修工事が実施された。改築ではなく改修となった理由は、将来の利用者数及び利用状況が現状以上には望めないことや、集成材構造の機能劣化がなく、改修コストのほうが無難なことであった。

改修工事は、地元の設計事務所が公共建築協会編平成9年版の「建築工事共通仕様書」²⁾に従って作成した設計書を基に、地元建設業者が工期3ヶ月、総工費6,221,000円(29,000円/m²)で施工した(写真1参照)。



写真1. 改修工事後の梅北児童館

改修内容は工事費内訳が良く示している。屋根を葺き替え、建具を交換し、内装はボード類の張り替えと

再塗装、設備も替えている。耐用年数の異なる部材や備品の交換である。これに対し集成材構造躯体は、そのまま継続使用された。躯体は1966年に地元丸十産業株式会社で製造されたスパン7.20m、高さ5.38m、樹種モミ・ツガ混用による材幅13.5cmの3ヒンジ・アーチである。継続使用するため、表面露出部は再塗装された。塗装費は71,360円で改修工事費全体の約1%であった(表1参照)。

表1. 梅北児童館改修工事費内訳

老朽化に伴う梅北児童館改修工事			
工期: 2000.11.21~2001.3.15 (スパン7,200mm、最高高さ5,380mm)			
改修工事総額		¥7,266,000	
間接経費	直接	6,221,000	
	共通仮設	124,000	
	諸経費	653,000	
1. 解体・撤去		242,000	石綿板、天井吸音板他
2. 仮設		737,000	足場他
3. 木工事		652,000	天井下地共
4. 屋根		1,396,000	屋根材、スタイロフォーム
5. 金属		139,000	
6. 左官		14,000	
7. 金属建具		1,079,000	アミ戸、ガラスコーキング
8. 塗装		977,000	
9. 内装		713,000	化粧石こうボード
10. 電気設備		270,000	照明
合計		¥6,221,000	

集成材関係工事費: オイルステイン/クリアラッカー (OSCL) 塗装 $32\text{m}^2 \times 2,230\text{円}/\text{m}^2 = 71,360\text{円}$ (全体工事費の約1%)

本施設は、改修時点で建設から35年を経過していたが、今回の改修によって、国土交通省の指針に示されている60年以上の長寿命が実現可能な見通しとなった。

今回の改修で注目すべきポイントを2つ挙げたい。一つはユリア樹脂によって接着されたモミ・ツガ集成材が35年経過していても、新品同等とみなされたことである。宮崎県木材利用技術センターで改修後の躯体の変位測定などからも物理的耐用性を裏付けることができた。

もう一つは、35年前に設計された集成材建築物が結果として社会的耐用性を立証することになったことで

ある。改修に当たって、都城市、地元設計事務所、施工業者、そして利用者の梅北町は地域材のモミ・ツガで製造された集成材の継続使用を肯定的に受け入れたことである。木造施設の長寿命化によって資源、コストの節減に成功したことで利用者の意識啓発にも役立っている(写真2参照)。

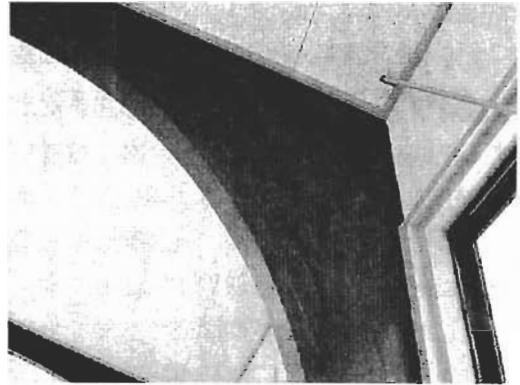


写真2. 再塗装されたモミ・ツガ集成材

2. 耐久性能向上技術の事例

ここでは筆者が取り組んだ代表的な耐久性能向上技術を3例紹介する。

(1) 屋内プール: 「太陽の郷スポーツガーデン」

1983年に神奈川県茅ヶ崎市南湖に建設された延べ床面積1,760㎡のベイマツ集成材による屋内プール施設「太陽の郷スポーツガーデン」は、オープン以来今年10月10日でちょうど20年を経過したことになる。その間一日も閉鎖することなく、少ないメンテナンスで連続使用されている(写真3参照)。集成材構造の研究成果が最大限に発揮された成功例と言える³⁾。

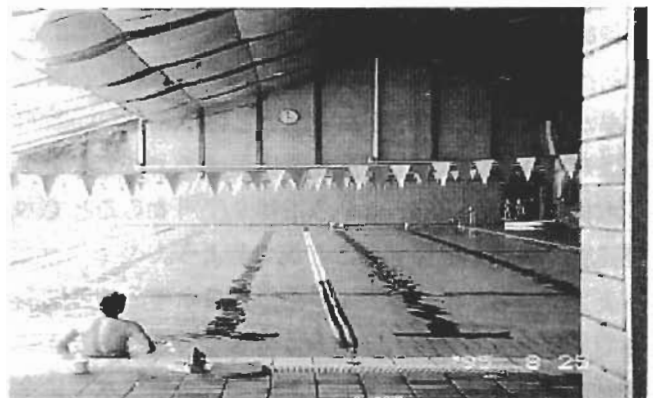


写真3. 12年経過時の「太陽の郷スポーツガーデン」

「太陽の郷スポーツガーデン」が建設された1982

年当時、国内には集成材構造のプールの建設実績はほとんどなかった。そうした状況で設計されながらも長期耐久性を確保できた要因として、第一に設計段階で木質材料の使用環境を的確に把握できたこと、第二に施設の運営や施設利用者の施設の使い方がほぼ計画通りであったこと、第三に維持管理が予定していた維持管理方法に従って実施されたことなどが挙げられる。

但し、オープンから1年間は計画通りの運営ができないことも多かったという。例えば、屋内プール周辺施設も集成材構造であるが、その屋根の庇を支え、屋外に面する集成材独立柱は、脚部を金物で被覆し鉄筋コンクリートの床に固定している。雨がかりが原因でこの脚部廻りに変色が起きたが、施設側は予め準備しておいた塗料を用いて維持管理方法に従ってメンテナンスを実施した。かなりの長期間にわたって少量ずつではあるが使用したという。腐朽原因の兆候と思われるこうした変化に早いうちに対処したことが、その後の耐久性に大きく貢献している。この例から、木質構造の耐久性維持には、施設オープン後間もない初期の段階で劣化を生じ易い部材を確認し、劣化対策を講じておくことが重要であるといえよう。

また、木質構造の屋内プールは、集成材の腐朽を防ぐような使用環境を設備との関係を含めて把握することが大切であろう。プール用途に集成材が向いているからという理由だけではなく、集成材を最良の方法で使用する環境を総合的に作り出していく性能設計の手法が求められている。

現在、集成材を利用した屋内プールは各地に数多く建設されているが、腐る事例も多いようだ。恐らく腐る条件が揃った屋内プールになっているのだろう。

集成材のプールも室内環境によっては腐朽することを前提に、腐朽対策が必要である。一般的に、表層含水率が高ければ高いほど腐り易いということが経験的には知られているが、温度と関係湿度によって決まる「木材の平衡含水率」という指標を使用することで木材表層の状態を把握することができよう。

表2で示したように、木材の平衡含水率の割合によってメンテナンスの内容を分けて考えることもできる。プールの使用環境に応じて、部位別に表層含水率に合わせた防腐対策を設計段階から配慮していく、いわば性能担保の考え方を取り入れることが施設を上手に使うコツといえる。

表2. 平衡含水率割合とメンテナンスの内容

木材の平衡含水率	メンテナンス内容
16%未満	一般の室内環境と同じ DRY CONDITION となり特に防腐対策は必要ない。 外観上褪色を嫌う場合は表面保護を目的とする塗装仕上げとする。但し、塗料自体の耐久性を考慮すること。
16~25%	WET CONDITION となり定期的な防腐対策が必要となる。 部材の点検、修繕、交換の難易によって、防腐処理の性能レベルを部材毎に決定する。 腐朽しやすい部材や接合部は、定期点検によって早期に劣化の兆候を発見できるようにする。 腐朽の兆候が見られた場合、部材の周辺環境を改善するか、防腐処理の性能レベルにあった防腐薬剤を利用する。
25%を超える	常時湿潤状態になり、本格的な防腐対応が必要となる。 本環境では腐朽することを前提に、どの部材のどこが劣化するかを予想し、目標とする供用年数に対応して防腐薬剤を選定する。 劣化の早期発見方法と対処法を設計段階で講じておく。その上で、定期点検を実施する。 設計段階で腐朽対応が難しい部材は、環境を改善するか、木材使用を中止する。

なお、「太陽の郷スポーツガーデン」は株式会社竹中工務店の設計施工である。集成材工事は三井木材工業株式会社の責任施工であった。当時、筆者は設計協力と現場工事の職長を担当した⁴⁾。

(2) 外構材の耐久性向上技術

本文では、外構材は集成材と一部鋼材によって構成される構造物を意味している。力学的条件（構造）と形状（デザイン）が一体となる場合が多く、集成材そのものが屋外に露出するという点で屋内プールの場合と異なり木材の使用環境を制御できない用途であり、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。

「清里の森シンボルゲート」は、1987年に山梨県北巨摩郡高根町に完成した。地域材であるカラマツを利用した断面 210 mm×210 mm のカラマツ集成材を組み合わせ、高さ 12m の木が連続して4本並ぶ様子を模したものでゲートのサインとして造られた(写真4参照)。

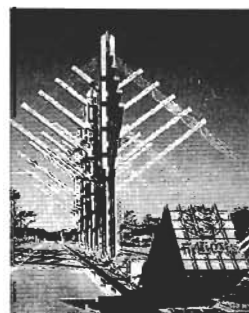


写真4. 清里の森シンボルゲート

この構造物は、「太陽の郷スポーツガーデン」の屋内プールの耐久性向上技術を応用した例である。以下に示すように、耐久性の高い材料を適所に用いるのではなく、供用開始から経過した年数に応じて想定される、設計書に示された集成材の要求性能に基づいて仕様を決めている。具体的には耐久性を向上させるため以下の技術的な配慮を加えた。

- ・集成材は水平使いを避ける
- ・接合金物には水抜き穴を設ける
- ・万一、水が進入した倍、鉄は腐食し、水を滞留させることが予想されるので金物はステンレスを使用する
- ・雨がかりする集成材木口面はステンレス製キャップを取り付ける
- ・干割れに対し少しでも効果があるように、乾式による薬剤を製品段階で圧入する
- ・表面保護のための防腐・防蟻塗装する
- ・地面に近いタワー脚部金物はステンレス製とし、蟻道を造り難くする

こうした仕様が全体の耐久性を向上させることに繋がっている。

本シンボルゲートは建設後15年が経過しているが、最近の管理事務所の説明によると色は褪せたが問題は発生していないとのことであった。今後も使用を続けるという。

この例は、集成材の使い方を設計段階できめ細かく研究することで集成材構造の耐久性が向上することを示した良い見本であろう。

こうして設計時点で細部にわたって決められた耐久仕様の内容に優先順位を付けるとすれば、環境への配慮と費用対効果の両面から、第1に「排水」、第2に「水抜き」、第3に「防水」、第4に「薬注」、そして第5に「部材交換」の優先順位になると考えている。

まずは、木質部材に水が滞留しない「排水」が可能となる使い方が大事で、それでも万一水が接合部や定着部の袋状となっている所に侵入した場合を想定して「水抜き」を設ける。次に撥水剤や保護用カバーによる「防水」、さらに防腐防蟻薬剤の「薬注」を検討、最終的には「部材交換」が前提という具合である。

なお、「清里の森シンボルゲート」は、テイク・ナイン計画設計研究所が意匠設計、TIS&PARTNERSが構造設計を担当。筆者は集成材の構造設計と耐久設計及

び現場施工に協力している^{39,51}。

(3) 木橋：「用倉大橋」

長大橋の「用倉大橋」は耐久設計の中でも、構造安全性の配慮に重点を置いている。

広島県立中央森林公園内に架設された用倉大橋は、広島県で当時扱い量の多かった地域材ベイマツの大断面集成材を用いている。有効幅員が5m、橋長が145mの車道用の斜張橋で1992年10月に完成した。翌1993年10月の新空港の開港と同時に供用を開始、今年で10年を経過したことになる(写真5参照)。



写真5. 完成時の用倉大橋

この長大橋は、橋を支え続ける土木資材として用いられたベイマツ構造用集成材に、重量鉄骨と同等の性能を期待したもので、大断面集成材なくしては実現し得なかった木造橋である。当時、広島県はベイマツによる木橋が木材利用の可能性を広げるものとしてその建設に期待をかけた。

ただ、大断面集成材とはいえ、ベイマツ集成材の主桁の断面は222mm×696mmと、さほど大きな断面ではない。木造橋とは言っても鋼材や鉄筋コンクリートを併用しており、主に三種類の素材を適材適所に使用した混構造なのである。本橋は、橋長が145.0m(支間距離:33.0m+77.0m+33.0m)、幅員が5.0mで、鉄筋コンクリート造のタワー2基を土台として、太さ44mmのケーブル合計12本で補剛桁トラスを吊っている。ケーブルで補剛桁トラスの両サイドを吊る定着部は鉄骨で、両定着部を繋ぐ構造材(横構)も鉄骨となっている。

① 構造安全性

用倉大橋は木橋でありながら、補剛桁トラス重量が

アスファルト舗装仕上げの重量も含め 400t 重を超えるかなり大規模なものである。当時、本橋の設計は許容応力度設計によって安全性が検討されていた。しかし、土木分野では橋梁の安全性の確認にいち早く限界耐力の考えを導入していた。そこで本橋もその対応が求められたが、わが国では木製斜張橋を解析した実績や長大橋の実績が少ないため、構造安全性の考え方はベイマツでの実績の多い米国の技術を主に参考にしながら従来通り許容応力度設計に基づいていた。

次に、構造材料の選定だが、当初は木造率を高めたものの意向があったものの、長期的な視点に立ち、予期しない大きな荷重が発生した場合も想定して限界耐力が必要な部材は鉄骨を採用することにした。鉄骨は安全率（構造物の破壊荷重）が算出できるため、万一の事態に対応しやすいとの考え方があったからだ。

集成材構造の設計法が許容応力度設計で留まっていることで、車道橋として本橋の使用限界が見えてこないのである。集成材構造でも限界耐力設計法を構築しないと構造安全性が不確かであり、橋梁は特にこの点が重視された。ここに橋梁の安全性に関する考え方の基本が示されている。それと同時に集成材構造の限界も見えた。

集成材の接合法については、将来接合部のガタつき発生の可能性も見据えて、耐久性の面からトラス部材の接合は全てピン接合で構成している。接合形式は外観検査やメンテナンスを考慮に入れて、断面欠損が多い複雑なジョイント法を避けるとともに、雨水排水が容易なボルトを利用した鋼板添板方式とした（写真6参照）。

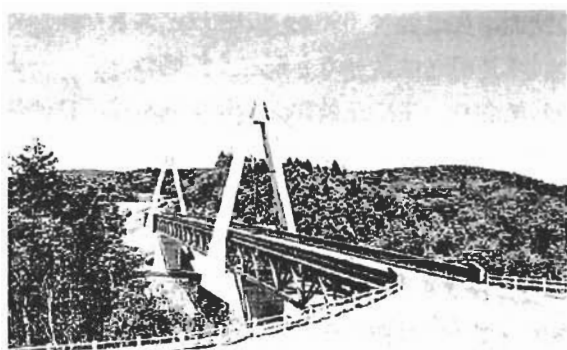


写真6. 接合は鋼板添板方式

なお、車道橋を実現するためには車の衝突に対応する木製防護柵（ガードレール）なども必要になる。車道

橋木製防護柵の実績がなかったため、米国の道路橋の基準 AASHTO を参考にして安全性の検討を実施した⁶⁾。本来衝突実験によりその安全性を確認しなくてはならないところであったが、森林公園内の管理用道路であり、また一方通行としていることから管理者の判断で安全性は構造計算によって確認されている。

衝突実験が必要なのは、強度安全性の他に車の衝突によって衝突後対向車線へ乗り入れないための離脱角度や乗員の安全性確保から車両重心加速度が基準値以下になることの確認など、計算では把握しきれない多くの点があるからだ。ここでも道路構造物の動的安全性に対する取り組み方がわかる。

また、公園内であることから通行を限定してはいるものの、不特定多数の利用を想定した車道橋のため、建築物より公共性がより一層強く求められることから、万一の事故に備えるためにもメタルやコンクリート橋の施工管理基準を参考にして工事記録を整備している。

②構造安全性能の維持

中央径間 77m、全長 145m の補剛トラスの構造安全性を 10 年、20 年もしくはそれ以上にわたって確保することを最優先する一方で、メンテナンスは必要最小限にとどめながら耐久性を維持しつつ、自然環境との調和も考慮することが課題であった。

まず、メンテナンスは 3～5 年毎の点検・修理を基本としたメンテナンスプログラムに基づいて実施し、必要があれば部品交換することにした。

耐久性の中心となる防腐対策は、部位別に材料を選定し、以下のような防腐方法を採用することにした。

床板は 170mm 厚、幅 1.5m、長さ 11m の大版サイズ（ベイマツ集成材）とし、コールタール・クレオソート油（通称クレオソート）を圧入、無塗装とした。横構の上にスパン方向に並べて敷き詰め、防水層を設けた上にアスファルト舗装による仕上げとする。

クレオソート油処理を選定した理由は、クレオソートが木材防腐保存剤として鉄道用枕木などに使用され、最も優れた実績を残していたからである。腐朽防止と共に含水率の変化に伴う干割れや亀裂発生を防ぐことも期待でき、同時に表面風化（肉やせ）も抑えることができる。重油をベースにしたクレオソート油は、木材表面からしみ出すことにより対人間および動物接触性で問題があるものの、本橋の場合には直接接触する機会は少ないと判断した（写真7参照）。

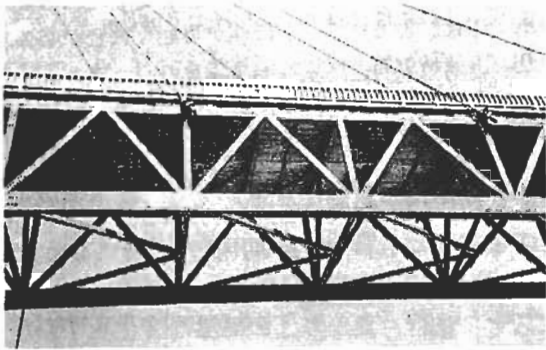


写真7. 床版をはじめトラス部材は全て見える

補剛トラスのベイマツ集成材は、油溶性防腐剤（ペンタクロールフェノール）を米国で注入、現場でキシラデコール塗装とした⁷⁾。油溶性防腐剤と塗装処理を選定した理由は、補剛トラスが橋の中心部材のため、メンテナンス時の部材交換が難しく、木材防腐保存の必要があり、油溶性防腐剤にはクレオソート油に次いで高い防腐効果が期待できたことにある。油性のためクレオソート油と同様に含水率の変化に伴う干割れや亀裂発生を防ぐことができる。しかも着色塗装が可能で美観維持のため彩色を施せる。彩色はクリア系の白木風に仕上げる方法もあるが長期的な観点からは、腿色が防げ、汚れが目立たないこげ茶色を選定した。

高欄は広島県産のスギ集成材、地覆は広島県産の赤松集成材を使用し、共にナフテン酸亜鉛を圧入、キシラデコール塗装とした。

ナフテン酸亜鉛と塗装仕上げを組合せた理由は、溶剤が揮発性のため表面が木地のままで仕上がることにある。しかも対接触毒性がほとんどない。連続した長い高欄は集成材橋のアクセサリとなる部位だけに、防腐効果は弱くなるものの、部材交換をしても、当初の美しさを保ちたいためである。なお、高欄に使用した集成材は耐久性向上の点から全て大きな断面としたうえ、組立て接合のための仕口および継ぎ手接合も複雑な加工を避けできる限りシンプルにして交換の容易さにも配慮した。

なお、2000年11月に実施した点検時に高欄、笠木および地覆に腐朽が発生しているのを確認している。このことは設計段階から予想されたことで、部材の交換は管理者側の都合で見送っている。

広島県と三井木材工業株式会社は用倉大橋の集成材構造に関して10年間の瑕疵担保契約を結んでいた。こうした例はそれ以前にも千葉県船橋市「鷹匠橋」⁸⁾

と神奈川県大和市「みどりのかけ橋」⁹⁾があるものの、規模の大きさと車道橋という点では前例がなく、10年間の瑕疵担保の対象を主構造のトラスに限定し、高欄は3年としている。本橋の瑕疵担保期間は、2001年10月をもって満了している。

なお、架設場所の広島県豊田郡本郷町大字上北方（県立「中央森林公園」）は2001年3月24日、震度6弱の芸予地震に見舞われたが、損傷などの被害はなかった。

地震の規模は、構造計算用に算出した地震時荷重レベル以下であった。部材の腐朽、接合部の異常など何らかの劣化があれば、地震によって変形は増幅され橋の形状が変化する筈だが、異常なしとすれば設計時の想定通りにこの橋は応答して、地震力に耐えてきたととみることができよう¹⁰⁾。この地震の経験から、耐久性は設計時に想定される様々な外的要因に対応した品質レベルを設定することで確保されるということが改めて確認された。なお、本橋の発注者は広島県新空港地域整備事務所、設計は広建コンサルタンツ株式会社、施工は株式会社栗本で、三井木材工業株式会社が上部工製作及び上部工架設工事を担当し筆者はその責任者であった¹¹⁾。

3. 相対的に決まる耐久性能

それでは以上のような耐久性向上技術の実績を踏まえ、木造の耐久設計について述べてみたい。

(1) 木質材料の耐久特性

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を使用し、断面を300mm×1560mmとし、重量鉄骨は断面をH-800×300×14×26とすることで剛性を等しくした。

大気中に置かれた鋼材の年間平均減厚を0.06mm/年^{12),13)}、スギ集成材の肉やせを0.1mm/年、モミ・ツガを0.05mm/年とした¹⁴⁾。その結果、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10mm程度、モミ・ツガの場合は5mm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6mm減厚すると、断面力は43%まで低下することになる。

集成材の減厚と鋼材の腐食による減厚の比較

鋼材：H-800×300×14×26(年間平均減厚は0.06mm/年)

スギ集成材：300mm×1560mm(年間平均減厚を0.1mm/年)

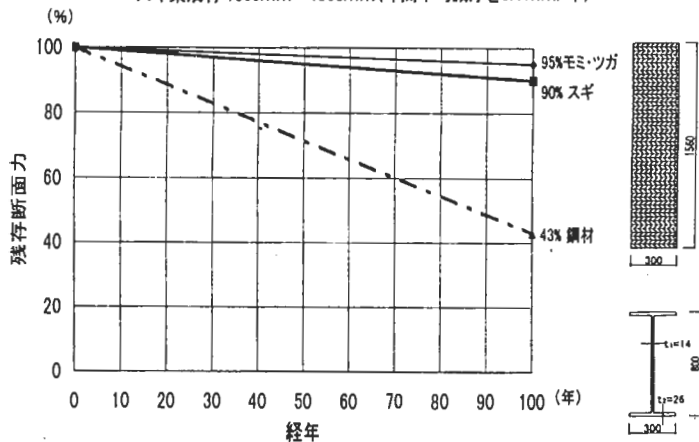


図1. 経年による残存断面力(断面二次モーメント)

構造用集成材がスギなど成長の早い樹種を使用した場合、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、大断面材を用いた集成材構造は100年経過後も、肉やせ対策による機能回復の必要が殆どなく、保守もしやすいといえよう。

ただし、肉やせを起こしやすい材料の集成材で、その表層部が構造に関係している場合には、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、保締力を期待できる接合具の選定、また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の使い方への配慮などが必要となる。

木材は使用環境を整備することで劣化を表層の肉やせだけにとどめることができ、少ないメンテナンスで100年以上の断面機能維持も可能となる。使用環境の整備という点で注意が必要なのは、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起こり得ることだ。それは使用環境の変化によって急激な劣化が進み機能が急速に低下する場合である。例えば、木材を雨水から守るカバー材が台風などで外れると外部使用の場合と同じような使用環境へと変化する。雨水が欠き込んだ接合部を通じて材深部へ常時浸入して、急速な劣化が始まる。大断面集成材であってもこの現象は必ず起こりうることから、「環境変化による劣化」として木材特有の現象を、イメージ図と

して図2のように表してみた。木造の耐用を60年とし、機能回復には断面二次モーメントが最低80%以上必要と想定している。

つまり、図2に示した「スギ大断面集成材環境変化による劣化(I)」のゾーンに突入しないようにすることが長期耐用の重要な点といえる。使用環境の変化に対応を怠ると、腐朽による急激な劣化が起こり得るのである。

従って、鋼材と異なりこの急激な変化を予防することが耐久性の向上につながることから変化をいち早く発見するため点検が非常に重要となる。

なお、図中の鋼材(20年毎塗装)は20年毎に鋼材表面を補修と塗装を繰り返す機能維持法をイメージしている。

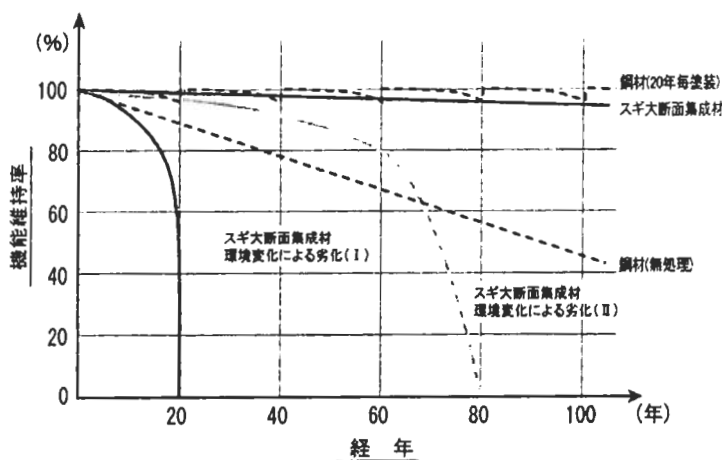


図2. 環境の変化による劣化のイメージ図

(2) 点検マニュアル

ここでは木橋の点検マニュアルについて述べる。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たわみがないことを確認する。次に、主構造部材については腐朽・蟻害、干割れ、接着剥離の発生の有無を、床版や高欄については欠損・磨滅、ぐらつき、ささくれ等の異常の有無を点検する(表3参照)¹⁵⁾。

ただ、木材は他の材料とは異なり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関しては、これまでに集成材構造を点検した筆者の多くの経験を基に、表4のチェックリストの使用を提案したい。チェックリストは「排水」、「水抜き」、「防水」、「薬注」、および「部材交換」の順に点検し、劣化の兆候を早期に発見することで健全な機能維持につなげる狙

いがある。

つまり、60年以上にわたって性能維持が確保できるように、将来起こり得る使用環境の急激な悪化の兆候を検知できる劣化予防チェックリストとなっている。

表3. 一般的な木橋の点検チェックリスト

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	異常の有無	異常の状況
主 構 造	桁	スギ 集 成 材	たわみ	無	
			腐朽	無	
			蟻害	無	
			下割れ	有	
			接着剥離	無	
			欠損・摩滅	無	
			接合異常	無	
			変形	無	
			ぐらつき	無	
			ささくれ	有	
			外観	良	
備考:			*その他項目		

表4. 木橋の劣化予防の点検チェックリスト

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	桁	スギ 集 成 材	排水	水勾配		
				排水路		
				木口水切り		
			水抜き	排水口		
				毛管没水		
				通気		
			防水	接合具廻り		
				塗膜		
				カバー材		
			薬注	シール切れ		
				表層硬度		
				内部高度		
			部材交換	有効断面		
				接合部欠損		
備考:						

3) 耐久性能設計への取り組み

これまでに筆者が設計・施工に携わった「太陽の郷

スポーツガーデン」や「用倉大橋」などいくつかの事例から検証されたことを、米国での木橋の設計手法を参考にしながら耐久設計の考え方をまとめてみたい。

木材の良さを生かし、接触性やテクスチャーも引き出し、なおかつ要求性能を満足させるのは大変な難題となる。それを解決するには、先ず木橋に要求される性能を分析し、その分析結果に基づいて木材や集成材の持つ物性、力学特性、耐久性などの要求性能を満たすべく、それらを有機的に総合して設計する最適設計の手法が必要となる。

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、メンテナンスが可能な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。

米国の木橋の場合、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、将来にわたる木橋の管理体制、維持管理など保守に割ける予算などを総合的に勘案し、設計条件として整理する。この設計と条件に基づき性能設計がスタートする。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。発注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年耐用の品質を現場でつくりこんでいくことになる。

一方、わが国の木橋づくりは、材料を指定する従来の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のも容易ではない。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。

木橋の耐用年数は、耐久性の高い材料を組み合わせただから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。

4. 特記仕様書の重要性

(1) 耐久設計の構図

設計と条件に示された諸条件を前提に性能を織り込み、性能維持期間も考慮した耐久設計は、特記仕様書に記載される劣化外力に対する性能レベルを示すと共に、点検マニュアルに盛り込まれる劣化外力に対する抵抗性の検定法も示す。耐久設計の際、修繕は費用対効果を最優先とし、性能回復で性能レベルを再設定が可能なものと定義する。この構図は維持管理は施工監理レベルによって左右されることを示している。

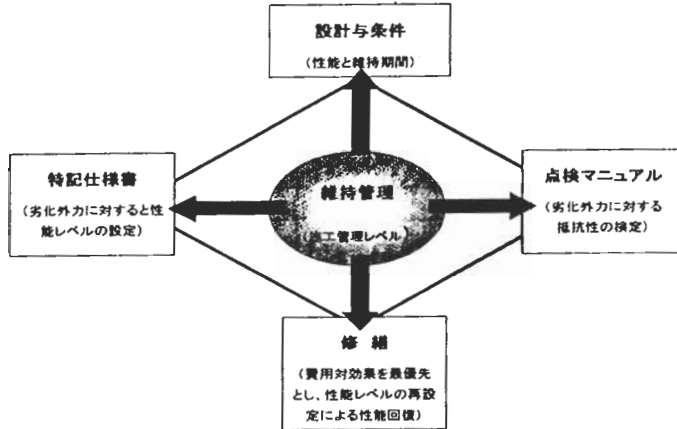


図3. 耐久設計の構図

2) 特記仕様書の役割

それでは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。筆者は特記仕様書を図3のように全体の体系の中で捉えている。

即ち、特記仕様書は設計書を補完するものではなく、耐久設計に示された劣化外力に対する性能レベルを具体的に設定する最も重要な役割を担うものと位置付けている。

したがって、特記仕様書で要求性能に対応する材料とその性能レベルをとりまとめるのは、設計作業と同時に進行する必要がある。しかも仕様書には第三者にも具体的に性能がわかるように、例えば維持管理については正しい使用のための条件、及び材料強度の等級などの物性が表示されなくてはならない。

参考までに、木橋の特記仕様書の見本を以下に示す。木橋に要求される諸性能を満たすため、集成材の強度等級決定から維持管理に至る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、項目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。

【特記仕様書】

1. 共通事項
1. 1 適用範囲
1. 2 一般事項
1. 3 準拠基準
2. 集成材や接合金物等の部品の品質
2. 1 一般事項
2. 2 集成材の強度等級
2. 3 防錆処理
2. 4 塗装
2. 5 接合金物
2. 6 アンカーボルト
3. 製作
3. 1 製作図
3. 2 集成材部材の寸法精度
3. 3 集成材部材の表面仕上げ
3. 4 接合金物の寸法精度
3. 5 接合金物の表面処理
4. 製品検査
4. 1 一般事項
4. 2 検査項目
4. 3 評価基準
5. 架設要領書
6. 瑕疵
7. 実験
8. 維持管理
8. 1 点検方法
8. 2 評価基準
8. 3 修繕方法

5. まとめ

本研究会における筆者の研究成果の発表は、設計の当初段階で織り込んだ耐久性向上技術の評価する機会でもある。

耐久性向上技術の研究開発の成果は建造物の経過年数に照らして評価すべきと考えており、その意味で、その成果は設計との対比を通じてむしろこれから生まれてくるとも言えよう。

今後はレスケミカル、ノンケミカルが強調されると予想されるが、木質材料に常につきまとう急激な生物劣化は環境変化に伴って生じる不可避の材料特性である。耐久設計で様々な配慮をしたとしても、耐久設計

の構図に示したような構図の一部が欠けて機能低下が急速に進行した場合には、重大な倒壊という事態が起きても不思議はない¹⁶⁾。ものをつくることの研究も重要であるが、つくった後の設計耐用年数を検証する研究はこれからが本番と考える。

材料指定から性能設計へ移行するということは、要求性能を満たせば、様々な材料が使用できることである。今後、環境への配慮やリサイクル、リユースが一層重視されると予想され、従来では考えられない自然素材（例えば草や蔦など）の活用方法を開発するのも研究者やエンジニアの役割となろう。その際、性能の要求レベルに達していることを確認する試験方法と評価基準の設定の中で、特に耐久性能に関するものが最も難しいと想像される。

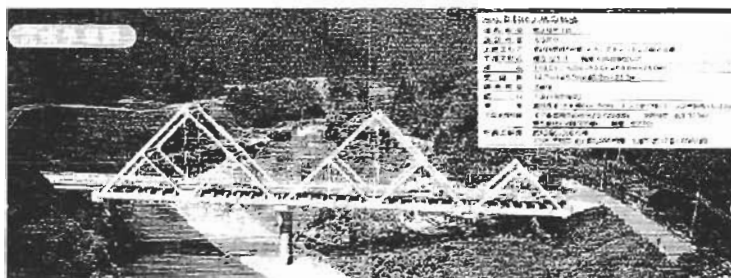


図4. 「新村所大橋」完成予想図

そのような状況に対応するためには、初期の設計と条件と運営状況をチェックする点検方法、利用者と管理者によって都度判断される社会的な耐用性の点検も含めた総合的なシステムの「耐久設計の構図」を関係者それぞれが把握することが重要となってくるだろう。

木質構造材が民間施設や公共施設において使用環境の厳しい場面で利用されるケースもますます増えていくと予想され、またそうでなくてはならないと考えるだけに、強度および耐久性の両面に重点を置いた利用技術の研究開発が大事だ。

宮崎県は現在、こうした考え方を取り入れながら、スギ集成材を使用した長大橋「新村所大橋」の架設工事を含めた多くの新しい用途開発に取り組んでいる（図4参照）。

引用文献：

- 1) 営繕協会編：“建築工事共通仕様書”，豊文堂，1961
- 2) 公共建築協会編：“建築工事共通仕様書”，豊文堂，1997
- 3) 飯村豊：「大断面材を使用した木質構造の耐久設計」，木材保存，27(6)，256-264(2001)
- 4) 日経アーキテクチャ：「太陽の郷スポーツガーデン」，200，11月21日号，1983，pp.168-171.
- 5) 今川憲英，岡田章：「木による空間構造へのアプローチ」，建築技術，9，106-108(1994)
- 6) 赤岸英治，平本勝吉，志水茂也，飯村豊，倉田修治：「用食大橋の設計・施工」，橋梁と基礎，28(5)，7-14(1994)
- 7) 奥迫輝昭：「広島県中央森林公園の木造斜張橋」，木材工業，47(12)，606-608(1992)
- 8) 飯村豊：「集成材を用いた木造橋」，木材工業，46(11)，50-54(1991)
- 9) 大谷利明，飯村豊：「大和市の木造最長斜張橋「緑のかけ橋」」，橋梁，28(2)，3-7(1992)
- 10) 藤野陽三，岩本政巳幸，加藤雅史，岡林隆敏，本田秀行，長井正嗣，志水茂也，平本勝吉，飯村豊：「集成材を補剛桁に用いた斜張橋(用食大橋)の振動実験」，橋梁，29(6)，19-21(1993)
- 11) 飯村豊：「集成材斜張橋用倉大橋の性能」，木材工業，48(12)，610-613(1993)
- 12) (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
- 13) (社)日本建築学会編：鉄骨工事技術指針・工場製作編，1996，p.525
- 14) 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.
- 15) 木橋技術協会編：“点検マニュアル”，(6)，1999，pp.1-21.
- 16) 飯村豊：「オーストラリア・ニュージーランドから学んだ木質接合技術」，JOURNAL OF TIMBER ENGINEERING，44，5-11(2001)

錦帯橋はなぜ 50 年もったか
— 錦帯橋の雨仕舞と老朽化 —

早稲田大学名誉教授
神山幸弘

まえがきにかえて— 沿革

錦帯橋は延宝元年(1673年)岩国藩第三代藩主吉川広嘉によって創建された。翌延宝2年洪水によって中央の3橋が流失するが直ちに再建される。その後、昭和25年のキジア台風によって5橋同時に流失するまで一度も流失することはなかった。270有余年の間では、記録によると平均して37年ごとの架け替え(5橋同時ではない)、17年毎の橋板の張替えならびに高欄材の交換が行われている。現在架替え中の錦帯橋は、昭和28年に早稲田大学教授佐藤武夫(建築)、同青木楠男(土木)両氏の技術指導の下に再建されたものである。現在の橋になってからは昭和44年に全橋の橋板の張替えと高欄材の交換が行われたのみで、後は腐朽部分の補強ならびに橋板間の隙間のシールである。

錦帯橋は人道橋であるため、通行者ならびに観光客の往来の安全を確保するためと長期使用を図るために昭和38年より今日まで5年置きに強度試験と劣化診断を実施してきた。最近の調査は平成10年に実施されたが、劣化部分があるにもかかわらず強度上の支障は見られなかった。しかし、職人の技能の伝承という視点で考えると、50年という歳月は長い。その結果が今回の架け替えにつながった。

幸いに、長く劣化診断に携わってきたので、錦帯橋が美観、構造体力に優れているばかりでなく、木造構築物の長寿命化の原理である雨仕舞の手法が随所に施されているのをつぶさに目にしているのが、建築的手法が如何に老朽化に対しての効果を挙げているのかを紹介したい。

1 錦帯橋の構造と材料

1.1 構造

錦帯橋は5橋よりなり、橋梁総長193.3m、第一、第五橋はそれぞれ34.8m、第二～第四橋は35.1mである。橋幅は5m、有効幅は4.25m、拱矢約4.7m、拱矢比1/7.5である。錦見側より第一橋と呼び山裾の横山側が第五橋である。第一橋と第五橋はともに柱で支えられているが、第二、第三、第四橋は反橋(アーチ)である。

反橋は5本の拱肋(桁、楔、棟木、後詰、平均木などで構成)で支えており、拱肋間隔は1.044m、幅は全径間を通して17cm、成は起拱部(根元)で1.4m、支間の1/8点で約1m、中央部で約42cmである。一本の拱肋は、桁44本、楔28本、棟木3本、後詰28本、平均木16本合計119本の材で組立てられている。楔は上下間の材の三角形部分の隙間を埋め、後詰は桁材の後ろに位置している。平均木は拱肋の最上部にあつて橋板が取付けられる。層状に構成されている上下の各材間の接触面には、1m間隔毎にだぼを配している。拱肋の一体性を図るために拱肋の両側面には鞍木ならびに助木が取付けられており、更に1m毎に鉄帯で拱肋を結束している。

各桁の両端には桁に直行して拱肋を串刺しにするように鼻梁と後梁が取付けられており、

1.2 材料

錦帯橋を構成する木材は、ヒノキ、マツ、ケヤキ、クリ、カシが用いられており、使用量は 479 m³である。部材と使用樹種との関係は以下のとおりである。

部材名称と使用樹種

橋番	部材名	樹種	位置・機能
第 二 ・ 三 ・ 四 橋	敷梁	ケヤキ	石台の上に据え、一番桁が乗る
	桁 1~3 10,11 番	ケヤキ	桁は半径間で 11 本ある
	4~9 番	マツ	
	楔(詰木)	ケヤキ	桁と桁の隙間を埋める
	後詰	ケヤキ	平均木と桁との間隙を埋める
	大棟木	ケヤキ	拱肋中央部で左右の拱肋を繋ぐ
	小棟木	ケヤキ	大棟木の上に位置している
	鼻梁 1~3	ケヤキ	桁先端に位置し、各拱肋を繋ぎ、拱肋間隔
	4~8	マツ	を維持し、横揺れを防ぐ
	棟木	マツ	11 番桁の先端にある梁
	後梁	敷梁上はケヤキ、他はマツ	桁の基部を繋ぐ梁
	化粧梁	ケヤキ	3 番桁と 4 番桁の間の 3 楔を貫く梁
	大梁	ケヤキ	4 番桁の末端にある梁
	鞍木	マツ	拱肋側面にある V 字形の部材、ずれ防止
	肋木	マツ	鞍木の変形防止のため鞍木間にある材
	振留(水平筋かい)	マツ	橋の一体化ため、拱肋間にある水平筋かい
平均木	マツ	拱肋の最上部にあって橋板を固定する	
葺板(下見板) 橋台	1,5 橋はヒノキ、他はケヤキ	拱肋を雨水から守る覆い板	
拱肋	ヒノキ		
梁鼻隠し板	ヒノキ	木口よりの雨水浸透を防止する覆い板	
第 一 ・ 五 橋	橋杭(柱)	マツ	桁を支える
	通し貫	マツ	橋杭を横に繋ぐ材
	筋かい	マツ	橋杭の横倒れ防止
	梁	マツ	桁受け材
	添え梁	マツ	
	桁	マツ	
	肘木	マツ	
	中梁	マツ	
	重桁	マツ	
	大梁	ケヤキ	
	平均木	マツ	
	梁雨覆板	クリ	雨がかり防止
桁雨覆板	クリ	雨がかり防止	
橋板(敷板)	ヒノキ	歩行用、中央部 55 枚、左右(段部)各 30 枚	

1.3 防腐処理—昭和 28 年再建時

防腐剤 PCP - na 塩 5%溶液

注入方式 ベセル法 635mm/cm² 以上の排気状態で 45 分間保ち、その後薬液注入先ず 2Kg/cm² で 60 分間、次いで 4Kg/cm² で 60 分間、更に 6Kg/cm² で 60 分間、最後に 8Kg/cm² で 180~240 分間加圧した。その後、635mm/cm² の排気状態を 45 分間以上保持した。薬剤温度は 40~45℃である。

標準注入量 ケヤキ:107Kg/m³ ヒノキ、マツ:216Kg/m³

養生 処理木材現場到着後、硫酸アルミニウム 1Kg を軟水 10%に溶解したものを木材 0.2783 m³あたり 1%の割合で表面に塗布した。又 部材の加工部分には油性 PCP を塗布した。

2 錦帯橋と雨仕舞

2.1 雨仕舞について

雨仕舞とは、雨水の浸入や漏るのを防ぐことであるが、その手法は防水のように防水材料という特定の材料を用いて表面一層で止水するのではなく、雨仕舞材料という特定の材料を用いず、水の摂理を利用して二重、三重の建築的な仕組みによって雨水を排除しようとするものである。

雨仕舞の原理ならびに機構は以下のごとくである。

雨仕舞の原理と機構

項目	内容	説明・要素
原理	水を近づけない 水に逆らわない 二重、三重の機構で防ぐ	水の侵入口となる隙間、亀裂などに水を近づけない。軒の出、庇、木口の覆い尾垂れ、水切り瓦などがこれに当たる 高きより低きに流れる水の性質を利用する 勾配、毛細管圧を除去するため間隔を不揃いにするなど 表面一層で水を止めるのではなく、藁葺き屋根の藁葺きの厚さのように急勾配をつけて、表面で流し、浸透した水も藁と藁の間がといとなって流下排水する
機構	水が入らないように 水が戻るように 水が止まるように 水みちを長く 水を抜く 風を防ぐ	水垂れ勾配、雨押え、水返し、水きり、立上がり等 水返し、立上がり、水垂れ勾配 空気穴、突起 水の侵入通路を迷路あるいは直線ではなく稲妻形として長くする 一旦入れた水を抜く、敷居溝底に掘られた穴 排水口よりの逆流を防ぐ防止弁等

2.2 錦帯橋に見られる雨仕舞

錦帯橋における雨仕舞には、以下のようなものがある。

- ・両側の拱肋より 60cm 突き出した橋板 橋板は拱肋の屋根葺、軒の出相当
- ・橋板端部裏面の水切り溝 雨水の裏面回りこみの防止
- ・両端拱肋(耳桁)の葦板覆い(押縁下見板張り) 横なぐり雨からの拱肋の保護
- ・両端拱肋の下端と葦板との段差 拱肋下端へ回り込む雨水の水切り

- ・平均木下にある拱肋を覆った銅版
- ・拱肋より突き出た梁類の木口覆い
- ・起拱肋部の通気構造
- ・高欄笠木上面の水垂れ勾配
- ・高欄束打抜き枘

これらを図示すれば以下のごとくである。

- 橋板間隙よりの漏水からの保護
- 木口よりの吸水防止
- 起拱肋部の土との接触防止と乾燥
- 雨水の滞留防止
- 枘穴への雨水滞留防止

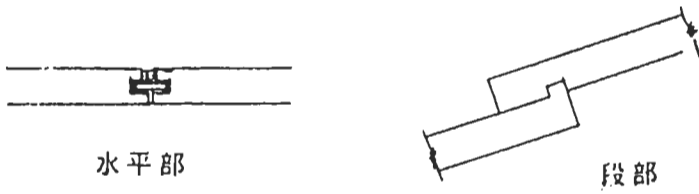


図-1 橋板の接合

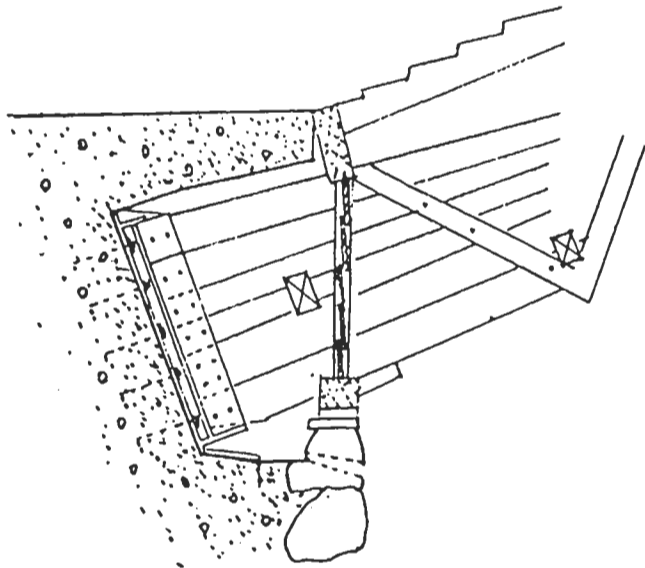


図-3 木造アーチ起拱部

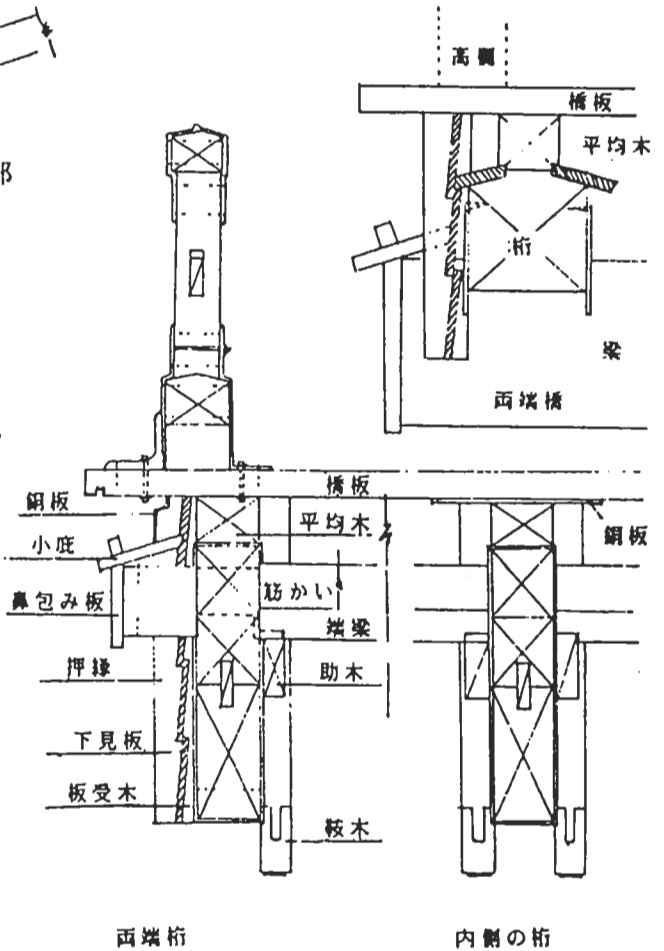
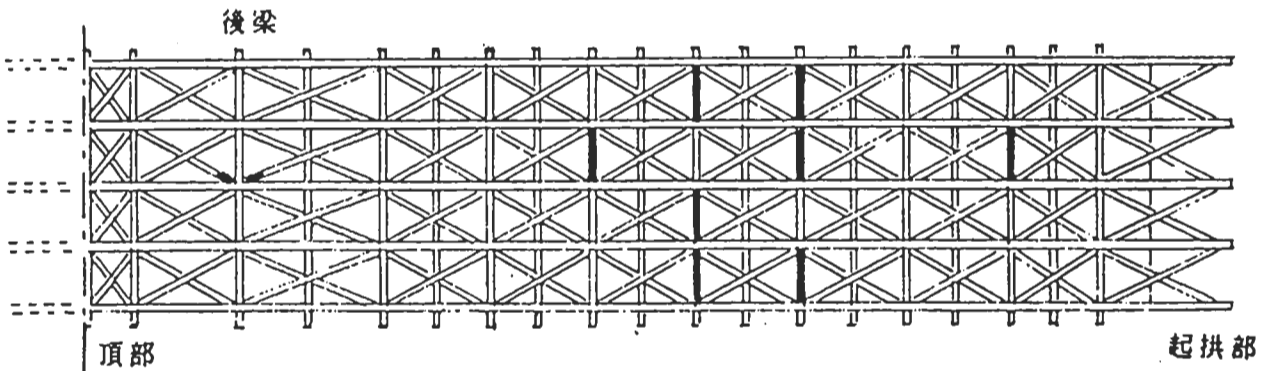


図-2 桁の両仕舞



3 老朽調査要領

5年間隔で行ってきた老朽調査は、高欄材(笠木、束、通し貫、土台、枕木、親柱)、橋板、拱肋全数の腐朽調査と橋板の摩耗調査である。調査期間が3日間であったので、次のような方法で行っている。

錦帯橋各部材の腐朽調査方法

測定項目	測定箇所	調査要領
目視	2,3,4 橋の全部材 1,5 橋の全部材 高欄の全部材 橋板上側部分の全部材	部材表面のしみ、変色、腐朽、土粒子の付着、雨水の流下跡等異常の観察
ハンマー打診	部材のあらわしになっている部分を約 15cm 間隔に打診	目視と同時に行いながら調査を進める 汚損耗のある部分ならびに直行する部材の接合部は入念に行う
探針	しみ、変色、腐朽、土粒子の付着跡、雨水の流下跡	打音異常個所について実施し、針の針入深さならびに針入範囲を測定する (針は先端 1mm の球状で、長さ 5cm の円錐状をしており、その先に握り部分がある健全部分への針入は約 2mm 程度)
含水率	目視、打音に異常があった箇所	周辺の建全部分との比較

上記の測定は次のごとく実施している。

調査は先ず目視しながら打診を行いつつ進み、しみ、変色、泥の付着部分では異常音ならびに湿っていると判断されれば、探針ならびに含水率をチェックする。(問題がなければ一々記録しない)

目視によって腐朽と判断されなくとも、探針ならびに含水率結果が異常であれば、周辺を含めて細かく調査する。

腐朽箇所が発見されたときは、探針によって腐朽の範囲ならびに針入深さを記録する。

調査方法の問題点

目視による腐朽診断は、初期腐朽には通用せず、腐朽性状が表面に現れたときにのみ可能である。肉眼では捕らえにくい腐朽をいくらかでも早くに察知しようとして含水率計が用いられる。打診法は表面腐朽よりも内部腐朽に対して適用されるが、それも腐朽部分が表面より 3cm 以上深部にあるときは判断がつきにくい。又 探針法では成長錐のようなものであれば別だが、材表面から押し込むものにあつては、表面からの腐朽深さは分かるが内部腐朽は判定できない。以上のような問題点を抱えて調査を実施してきた。

4 錦帯橋で予測された腐朽部材と解体に伴った結果

4.1 当初から予想された腐朽箇所

錦帯橋の雨仕舞の項で説明したとおり、雨仕舞が目的どおりに機能してくれば腐朽箇所はおのずと判明してくる。構造部分の腐朽の原因となる水の供給は、直接雨水に曝される、橋板間隙からの漏水、起拱部覆いコンクリートよりの漏水と判断した。それらは次のような箇所となろう。

- ・高欄材 理由として 直接雨露に曝されている

・橋板木口よりの腐朽	同上
・橋板と平均木接合のための犬釘周辺	犬釘部分よりの雨水浸透
・平均木上部	犬釘を伝っての雨水の浸透
・鼻梁、後梁	橋板継ぎ目よりの漏水
・振留	同上
・木口覆い板	直接雨露に曝されている
・橋杭(柱)	川・雨露に曝される

高欄材、橋板、木口覆いの厚い板は、直接雨露に曝されるので当初から腐朽するのは時間の問題であると予想していた。平均木についても犬釘部分からの雨水の浸透があれば腐朽する可能性があるという判断であった。更に 橋杭にあっては従来の木造橋と同様に最も腐朽しやすい材であると判断していた。

拱肋間に渡されている梁類ならびに振留は、橋板で直接雨水より保護されているが覆いが無いために、橋板の継ぎ目より漏水があるときは、雨水が滴下してこれらの部材は湿潤となり腐朽する。

拱肋にあっては、最上部の部材である平均木の下に銅板が敷かれており、橋板の継ぎ目隙間より漏水した雨水は銅板を伝わって川面に滴下するので腐朽は免れるであろうと想定した。

4.2 解体時の調査結果

昨年(平成 13 年 12 月)行ったブロック解体材を調査した結果、特徴的なことを述べれば以下のごとくである。

橋板	橋板表面犬釘打ち込み部分、木口部分より侵入した内部腐朽
覆い板	木口面に取り付けた垂直の板より、差掛けた勾配のある板が腐朽大
平均木	一箇所でも水分が浸透すると、材が割れているので水分が移動し腐朽拡大
梁類	橋板間隙よりの漏水の滴下により腐朽、桁材への水分、腐朽菌の移動
振留	同上
拱肋	腐朽した鼻梁、後梁が貫通している部分の桁材に内部腐朽が見られた

上記の中でも解体調査で明らかになったのは、桁の内部腐朽の状況である。これについては今後の劣化診断方法の検討も兼ね試験中である。

あとがき

錦帯橋は当初の設計が、構造主体であり、工事の難関が予想される拱肋に対し、雨がかりを防ぐ建築的手法である雨仕舞構法を随所に適用している。使用している木材についても耐朽性のある心材の多い樹種を採用している。昭和 28 年再建後の維持管理については橋板間隙部の漏水を防ぐべく、シールが行われている。このことが忠実に実行に移されたことによって、腐朽発生の原因を阻止し、雨仕舞構法と相俟って錦帯橋は今日まで保たれたものと確信している。

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

2002年度合同研究会 2002年12月13～14日（広島市）

担当幹事

森林総合研究所	桃原 郁夫（生物劣化研究会）
ケミプロ化成	松阪 裕（生物劣化研究会）
信州大学	武田 孝志（木材強度・木質構造研究会）
岩手県林業技術センター	東野 正（木材強度・木質構造研究会）
広島県林業技術センター	藤田 和彦