

002

JSCE 木材利用ライブラリー

木橋の耐用年数

平成23年11月

土木学会 木材工学特別委員会

木橋の耐用年数

目次

第1章	はじめに	1
第2章	耐用年数の予測	1
第3章	構成要素の点数の計上方法	5
第4章	構成要素の配点に関して	6
第5章	耐用年数予測法の検証	12
第6章	まとめ	19
第7章	おわりに	19

第1章 はじめに

生物劣化である腐朽の始まりは、空气中を飛散する孢子が木材表面に付着し、酸素と適当な温度、そして水分の供給によりこれが発芽して菌糸となり、内部へ伸長することである。内部で繁殖した腐朽菌は、木材成分を分解し、やがて表面に子実体をつくる。この段階で我々は、腐朽を明瞭に視認できることとなる。腐朽は、温度・水分・酸素・腐朽菌が必要因子であり、このうちのいずれが欠けても進行しない。例えば、地下水位の高い場所に打たれた木杭などは、空気が遮断されるために、腐朽が進行しないことはよく知られている。屋外構造物である木橋にとっては、腐朽は天敵であり、木橋の歴史は腐朽との戦いの歴史でもある。

1980年代後半から始まった我が国の近代木橋建設は、集成材に代表される材料の革新と防腐処理技術の発展があいまって、今日では大規模なアーチ橋等を造るまでに至った。一方では、腐朽による撤去や架替を経験し、このため、古くからある水仕舞いの手法の改善や、屋根の代用ともなるコンクリート床版や鋼床版の採用等が行われ、近代木橋の寿命は、古典的木橋に比べて、大きく延びることが予想される。しかしながら、我が国においては、過去においても近代においても、計画する木橋の耐久性、具体的には耐用年数を見積もることがなされたことはなかった。また、近代木橋の発祥の地であるヨーロッパ諸国や、カナダおよび北米においても、耐用年数について記述されたものは見受けられない。何らかの方法で耐用年数を算定できれば、管理者の不安を除去し、木橋の適切な利用に結びつくものと考えている。

本巻は、このような観点から、土木学会に平成21年5月に設置された「木材工学特別委員会」の下部組織である「木橋研究小委員会」の委員が中心となり、約3年の議論を経て耐用年数の予測法を、既存の木橋の点検結果を基に提案するものである。

第2章 耐用年数の予測

2.1 基本方針

木橋の耐用年数の予測法は、木造建築物の耐用年数の推定方法¹⁾や既往の研究成果^{2),3)}を参考として、木橋特有の要因を設定し、各種の要因を点数として予測式に代入することで、耐用年数を導くものである。ただし、この耐用年数は「腐朽」に関するものであり、地震等の天災や、輪荷重の影響等による経年的な損傷・疲労・劣化は考慮していない。

また、耐用年数を予測するにあたり、ここでは、主材（主桁等の主構造部材）の耐用年数を橋梁としての耐用年数と捉えている。耐久性に影響する橋梁の部位は、主材の他にも、床版や吊り橋等のケーブル、下部工も挙げられる。ただし、床版は、コンクリート床版や鋼床版等、木材以外の材料が使用される場合もあることや、主材に比べると取替えや補修が容易であること、下部工は、近年ではコンクリートで造られることが多いこと等から、主材のみを対象としている。

2.2 耐用年数予測法

耐用年数は、表-1に示す影響要因を点数化し、式(1)に代入することで得られる指標値 Y により、図-1を用いて予測する。なお、表-1の p_1 や p_2 等の影響要因の構成要素に関する点数は、次頁に示す表-2を用いて、予測対象の諸元に応じて設定すればよい。

$$Y = P \times E \times S \times D \times C + M \quad (1)$$

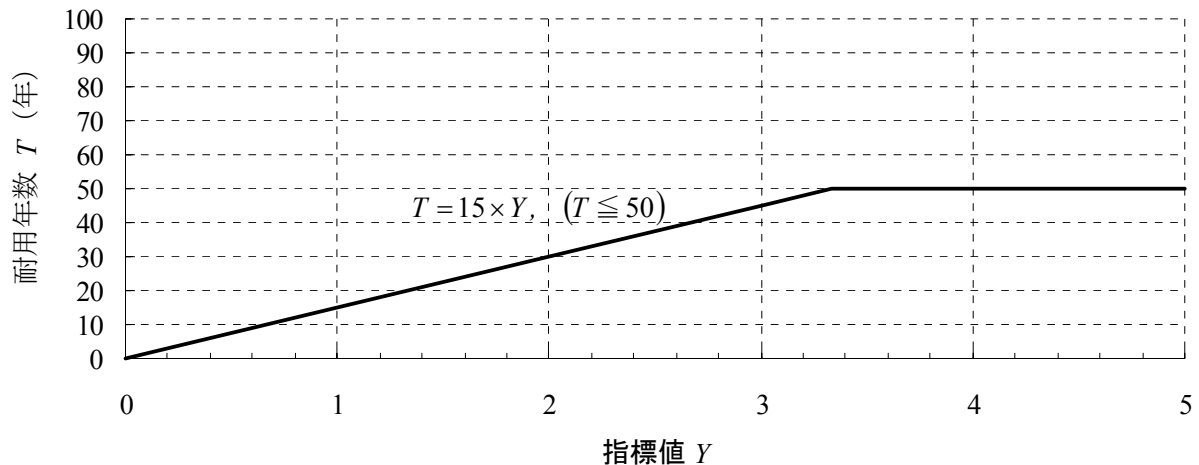


図-1 指標値 Y と耐用年数 T の関係

表-1 影響要因とその構成要素

影響要因		各要因の構成要素と概要		各要因の点数の算式
使用材料	P	p_1	材料(樹種)固有の耐朽性	$P = p_1 + p_2 \times p_3$
		p_2	材料(樹種)固有の防腐剤の浸透性	
		p_3	防腐処理の方法	
周辺環境	E	e_1	地域別の腐朽菌の生育条件	$E = e_1 \times e_2$
		e_2	架橋位置の局所的環境条件	
構造形式	S	s_1	屋根の有無	$S = s_1 \times s_2 \times s_3 \times s_4$
		s_2	上路式・下路式等の区分	
		s_3	桁橋・トラス橋等の橋梁形式	
		s_4	鋼床版・木床版等の床版形式	
腐朽防止 (構造)	D	d	桁覆や接合部の水仕舞い方法等	$D = d$
腐朽防止 (施工)	C	c	後加工部の防腐等の現場対応	$C = c$
保全行為	M	n	保全行為の回数	$M = \Sigma(n \times m)$
		m	再防腐塗装や腐朽箇所の補修等	

表-2 構成要素の点数

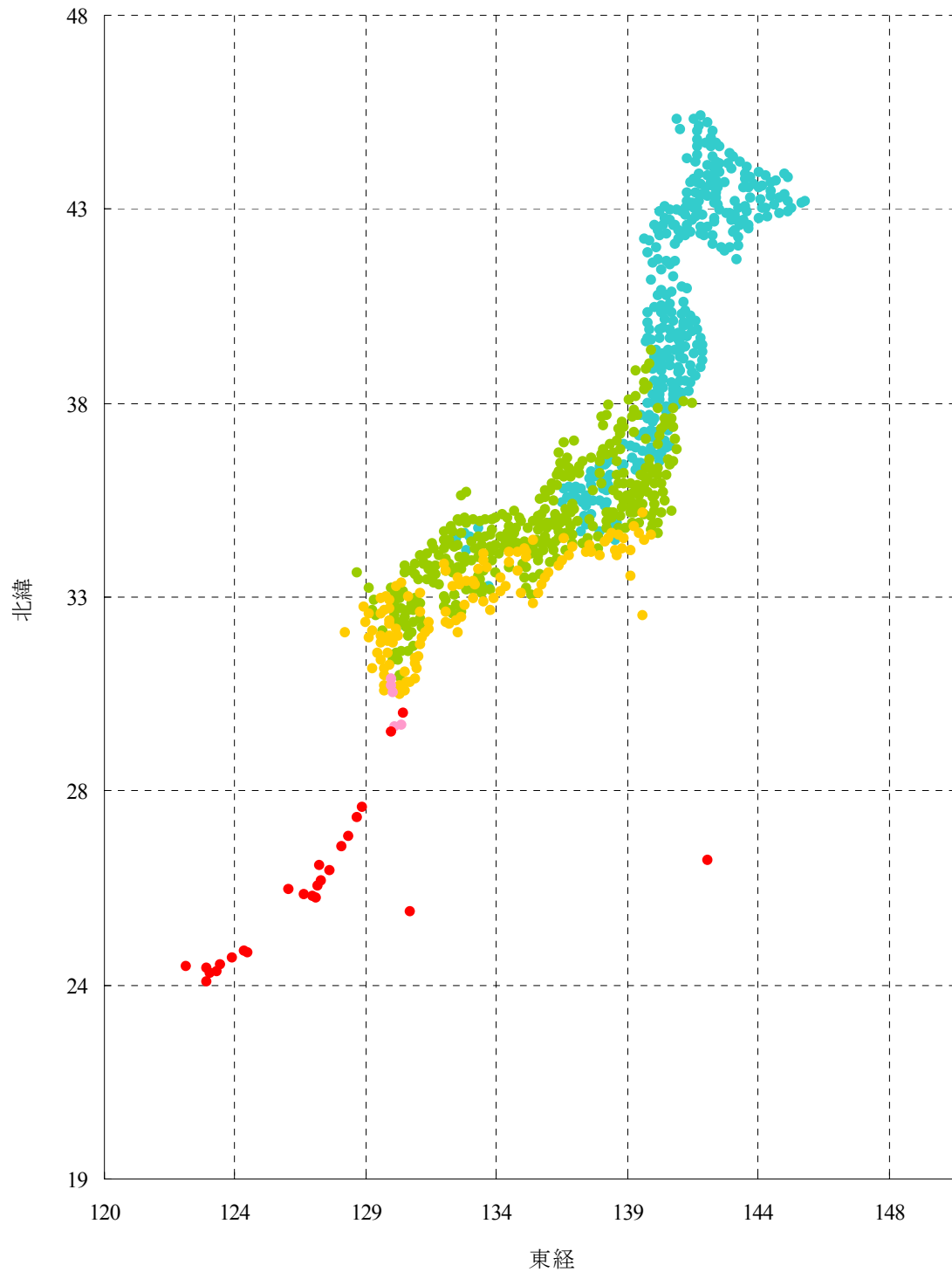
p_1		p_2		p_3	
ヒノキ、ボンゴシ、ケヤキ、ヒバ、クリ	1.5	ヒバ	1.1	注入処理と表面処理	1.0
スギ、ベイマツ、カラマツ、クヌギ	1.0	スギ、ベイマツ、モミ、アカマツ、クロマツ	1.0	注入処理	0.6
モミ、アカマツ、クロマツ	0.9	ヒノキ、ケヤキ、カラマツ、エゾマツ、トドマツ	0.9	表面処理	0.3
トドマツ、エゾマツ、クスノキ	0.8	クリ、ボンゴシ、クヌギ、クスノキ	0.8	防腐処理なし	0

e_1 ※		e_2		s_1	
地域区分 1	1.2	一般環境	1.0	屋根あり	2.0
地域区分 2	1.1	湿潤環境	0.7	屋根なし	1.0
地域区分 3	1.0				
地域区分 4	0.9				
地域区分 5	0.8				

s_2		s_3		s_4	
上路橋	1.0	桁橋	1.0	鋼床版、コンクリート床版	1.8
中路橋	0.8	アーチ橋、ラーメン橋	0.9	木床版（舗装あり）	1.5
下路橋	0.8	床版橋	0.8	木床版（敷板）	1.0
		トラス橋	0.7		

d		c		m	
特に配慮した構造	1.3	特に配慮した施工	1.2	主桁の再防腐塗装、腐朽箇所の補修	0.3
一般的対応	1.0	標準施工	1.0	保全行為なし	0

※；腐朽菌の生育条件（ e_1 ）を選定する際の地域区分は、次頁に示す図-2を参照する。



- 凡例
- 地域区分1；架橋地点の年平均気温の全国年平均気温に対する比率 0.74未満
 - 地域区分2；架橋地点の年平均気温の全国年平均気温に対する比率 0.74以上1.00未満
 - 地域区分3；架橋地点の年平均気温の全国年平均気温に対する比率 1.00以上1.16未満
 - 地域区分4；架橋地点の年平均気温の全国年平均気温に対する比率 1.16以上1.25未満
 - 地域区分5；架橋地点の年平均気温の全国年平均気温に対する比率 1.25以上

図-2 腐朽菌の生育条件 (e_1) の選定に関する地域区分

第3章 構成要素の点数の計上方法

3.1 使用材料

p_1 と p_2 は、材料固有の耐朽性と防腐剤の浸透性を反映するものであり、主材に使用する樹種に応じて点数を計上すればよい。 p_3 は、防腐処理内容を反映するものであり、主材に施した防腐処理方法に応じて点数を計上すればよい。なお、ここに示していない材料を用いる場合や、高性能な防腐剤を使用する場合等は、適宜に設定して頂きたい。

3.2 周辺環境

e_1 は、地域別の腐朽の可能性を反映するものであり、架橋位置（東経・北緯）に応じて点数を計上すればよい。ただし、 e_1 は架橋地点付近の局所的な情報は反映できないために、湿地や湖沼に架ける場合や、山間部の山際に位置する場合等、常に水分が供給され、さらに腐朽の可能性が強まる場合については、 e_2 を用いることで反映させる。

3.3 構造形式

s_1 と s_2 は、屋根の効果を反映するものである。屋根の設置の有無や、上路橋・中路橋・下路橋の区分に応じて点数を計上すればよい。 s_3 は、橋梁形式を腐朽の一因と捉えたものであり、桁橋やアーチ橋等、予測対象の橋梁形式に応じて点数を計上すればよい。 s_4 は、床版の形式を腐朽の一因と捉えたものであり、鋼床版やコンクリート床版、木床版等の種類に応じて点数を計上すればよい。

3.4 腐朽防止(構造)

d は、腐朽に対する構造的処置を反映するものである。桁覆の設置や、部材と部材を密着させない工夫、排水勾配の確保、排水装置の設置、橋座等の通気性が悪く、腐朽が生じる可能性が高い箇所には、積極的に木材を使用しない等、主材の腐朽対策（雨露・湿気対策）を特に実施した場合は、「特に配慮した構造」として点数を計上する。このような特別な対策を行わない場合については、「一般的対応」として点数を計上する。

3.5 腐朽防止(施工)

c は、腐朽に対する施工時の対応を反映するものである。仮置き時の雨露対策として、部材をシートで保護する等の対応や、ボルト孔の防腐処理等の現場での処理は重要であり、このような腐朽対策を行った場合については、「特に配慮した施工」として点数を計上する。また、特に施工に支障がなく架設が完了した場合は、「標準施工」として点数を計上する。

3.6 保全行為

m は、保全行為の効果を反映するものであり、保全行為を実施した回数 n を乗じた点数を計上する。例えば、竣工後に主材の再塗装を2回、腐朽箇所の補修を1回実施した場合には、 $M=\Sigma(n\times m)=2\times 0.3+1\times 0.3=0.9$ と算出される。なお、日常的な清掃等については、必ず実施されているものとし、また、これを保全行為としては計上しない。

第4章 構成要素の配点に関して

4.1 使用材料

(1) 材料（樹種）固有の耐朽性

木材は生分解性の材料であり、微生物や一部の昆虫類により劣化が生じる。なかでも、主に担子菌類（キノコの仲間）によって生じる腐朽は、木製構造物に甚大な被害をもたらす場合があることから、木橋のように木材を屋外で使用する場合は、腐朽による劣化を防止することが重要である。なお、上記のような腐朽菌が、木材を腐朽させる要因としては、周辺環境も大きく関与するが、これについては後述することとし、本項では材料（樹種）固有の耐朽性と、その関連事項について示すものとする。

木材の耐朽性は樹種によって異なり、また、同じ樹種でも部分によって耐朽性が異なる。通常、木材の断面を見た時に外周部分の淡色部分を「辺材」、辺材の内側にある濃色部分を「心材」と呼ぶ。辺材には、糖類・蛋白質・アミノ酸など、腐朽菌やカビなどの栄養源となる成分が多く含まれている。一方、心材には、フェノール・ポリフェノール類・トロポロン類・テルペン類など、木材腐朽菌やカビなどに抵抗性を示す成分を含むものが多い。このように、含有している成分によって、辺材と心材には耐朽性に違いが見られ、いずれの樹種においても辺材の耐朽性は低い。また、一般に木材の耐朽性は、心材の耐用年数で議論され、各樹種の心材に含まれている成分の違いなどにより、樹種によって違いが生じる。

木材の耐朽性を判定するための一般的な方法に、野外杭試験がある。この試験は、3×3×60cmの杭材を、長さの半分（30cm）まで地面に埋め込み、その後の経年変化を、表-3に示すように、「健全（被害度0）」から「形が崩れる（被害度5）」までの6段階で評価するものである。一般に、被害度が2.5に達した年数が耐用年数とされ、この耐用年数により木材（心材）の耐朽性が、表-4に示すように区分されている。

構成要素 p_1 の配点は、木橋に用いられることの多い樹種に対して、表-4の区分と、これまでの架橋経験等に基づき設定したものである。ヒノキ・ケヤキ・ヒバ・クリなどは、一般的に耐朽性が高い樹种群であることから、最も高い点数を付与した。一方、スギ・ベイマツ・カラマツなどについては耐朽性が「中」、モミ・アカマツ・クロマツなどについては「小」、エゾマツ・クスノキなどは「極小」と分類されることから、これらを考慮して配点した。

表-3 野外杭試験における被害度判定基準

被害度	判定基準
0	健全
1	部分的に軽微な腐朽（虫害）
2	全体的に軽微な腐朽（虫害）
3	全体的に軽微な腐朽（虫害）、かつ、部分的に激しい腐朽（虫害）
4	全体的に激しい腐朽（虫害）
5	腐朽（虫害）により形が崩れる

表-4 樹種別（心材）の耐朽性⁴⁾

耐朽性の区分	日本材	北米材、ロシア材	南洋材
極大 (9年以上)			ギアム、コキクサイ、パウラ、セランガンバツ、ヤカール、エボニー、ウリン、イビール、メルバウ、インツィア、ピチス、チーク、パンキライ、コムニヤン
大 (7~8.5年)	ヒノキ、サワラ、ネズコ、アスナロ、ヒバ、コウヤマキ、クリ、ケヤキ、ヤマグラ、ニセアカシヤ、ホオノキ	ベイヒ、ベイヒバ、インセンスシダー、ベイスギ、セベルセコイア、ブラックウォールナット	レンガス、レザック、ナリグ、ケラット、ホワイトメランチ、セプターバヤ、パドーク、ピンカドー、セドレラ、チュテールパンコイ、マホガニー
中 (5~6.5年)	シラベ、カラマツ、クサマキ、イチイ、カヤ、トガサワラ、スギ、カツラ、スダジイ、クスギ、ナラ、アラカシ、シラカシ、タブノキ	ダフリカカラマツ、ペイマツ、ホワイトオーク、ベカン、バタナット	カナリウム、クルイン、カプール、ブジック、ライトレッドメランチ、イエローメランチ、マラス、メンガリス、ケンバス、アルトカルプス、バカウ、スローラクラハム、カロフィルム、テラリン、メルサワ、チュテールサール、ボルネオオーク
小 (3~4.5年)	モミ、アカマツ、クロマツ、イチヨウ、マカンバ、コジイ、コナラ、アベマキ、イスエンジュ、アカガシ、イチイガシ、ヤチダモ、キハダ、ヒメシヤラ	ボンデローサマツ、スラッシュマツ、ストローブマツ、テーダマツ、ペイツガ、ソフトメープル、イエローバーチ、ヒッコリー	アローカリア、カボック、ドリアン、ターミナリア、エリマ、アビトン、アルモン、レッドラウン、タンギール、マンガシノロ、ニュージランドビーチ、ピンタンゴール、ゲロンガン、ジョンコン、マングローブ、マトア、タウソ、カサイ、ナトー、ケレダン、ユーカリ
極小 (2.5年以下)	ハリモミ、アオモリトドマツ、トドマツ、エゾマツ、トガサワラ、イタヤカエデ、セン、ヤマハンノキ、ミズメ、シラカンバ、アカシデ、ミズキ、ブナ、イスノキ、トチノキ、クスノキ、シナノキ、シオジ、ドロノキ、オオバヤナギ、イイギリ、オオバボダイシユ	ベイモミ、スプルース、ラジアータマツ、アスベン、コットウッド、アメリカシナノキ	アガチス、ブライ、ジェルトン、カラス、パラゴムノキ、ラブラ、アンペロイ、セルチス、キャンブノスパーマ、アルストニア、プランチョネラ、バスウッド、ロヨン、ホワイトシリス、ラミン、カナリウム、オベチヨ、アルマンガ、ピヌアン、カランバヤン、チャンバカ

表-5 樹種別（心材）の薬剤浸透性⁵⁾

浸透性の区分	日本材	北米材	南洋材
良好	ヒバ、エノキ、イタヤカエデ、シデ類、チシヤノキ、ツバキ、トネリコ、ハンノキ、ミズキ	ボンデローサマツ、レッドウッド、ブラックガム、グリーンアッシュ、レッドオーク、エルム、バーチ	アビトン、バクチカン、バルサ、ドリアン、ゲロンガン、ジェルトン、ケンバス、クルイン、マンガシノ、パラゴムノキ、ラミン、ホワイトラウン、アンチアリス、アルトカルプス、リツェア、スボンジアス、マソニア、ハードセルチス、プランチョネラ、アルストニア、セルチス、エボジア、バラキユウム、ニューギニアバスウッド、ステルキュリア、アンペロイ、ホワイトシリス、スブラ、バラルトカルプス
やや良好	アカマツ、クロマツ、スギ、ツガ、ヒメコマツ、モミ、アサダ、マカンバ、シオジ、ハルニレ、ユズリハ	バルドサイプレス、ジャックパイン、ロブローパイン、ホワイトパイン、ペイマツ（コースト）、ウエスタンヘムロック、チェストナット、オーク、コットンウッド、シュガーメープル、イエローバーチ	アルマシガ、ダンゴン、マヤビス、メラワン、テレントン、イエローメランチ、レッドブラウンターミナリア、イエローターミナリア、エリマ、カナリウム
困難	エゾマツ、トドマツ、トウヒ、ヒノキ、イスノキ、クルミ、ケヤキ、コジイ、ダケカンバ、ブナ、ネムノキ、ミズメ、ヤマザクラ	イースタンヘムロック、ロジボールパイン、シトカスプルース、ノーブルファー、ホワイトファー、ロックエルム、イエローポプラ	パウラ、チェンガル、カプール、チーク、マラス、カメレレ、イエローハードウッド
極めて困難	カラマツ、カシワ、カツラ、キハダ、クリ、クスギ、クスノキ、コナラ、センダン、セン、タブノキ、ミズナラ	ペイマツ（マウンテン）、ノーザンホワイトシダー、タマラック、ベイスギ、アメリカンビーチ、チェストナット、レッドガム、ホワイトオーク	アルモン、バナバ、パンキライ、ダガン、ダークレッドメランチ、イビール、マホガニー、メダン、メルサワ、モラベ、コキ、パロサビス、レッドラウン、レッドメランチ、タンギール、セランガンバツ、ジャラ、ニューギニアウォールナット、ランラン、クワンドン、カロフィルム、タウソ、パシフィックメープル、スロアネア、ウォーターガム、ニューギニアローズウッド、ブラックビーン、ガムラート、アグライア、クイラ

(2) 材料（樹種）固有の薬剤浸透性

木材の耐朽性を向上させるためには、薬剤による保存処理が効果的である。特に、薬剤を強制的に浸透させる「加圧注入処理」は、高い耐朽性を付与する方法として、建築材料等の保存処理において一般的に行われている。薬剤の浸透が容易であれば、木材の外周部に処理層が確保されやすい。いずれの樹種においても、辺材の薬剤浸透性は良好であるが、心材については、表-5に示すように、樹種によって薬剤の浸透性が異なる。構成要素 p_2 は、 p_1 と同様に、表-5の区分とこれまでの架橋経験を参考として、浸透性の難易に合わせた配点を行った。ただし、日本農林規格（JAS）や優良木質建材等認証（AQ）における保存処理に関する基準では、浸潤度（外周から一定の深さにおける薬剤の浸潤割合）が規定されており、これらの基準を満たす材料については、一定の処理層が確保されていると考えられる。このため、 p_2 の配点傾斜は小さく設定している。

(3) 木材保存処理方法

薬剤を用いた木材の保存処理は、木材の耐朽性を向上させるうえで非常に効果的である。薬剤による木材保存処理は、表面処理と上述の加圧注入処理があるが、それぞれの防腐効果は異なる。表面処理の場合、薬剤の浸透は材料表面にとどまるため、ある程度の防腐効果は期待できるが、長期的な効用を見込むことは難しい。一方、加圧注入処理は、強制的に薬剤を木材中に浸透させるため、外周から深さ10mm程度まで薬剤処理層を設けることができる。この薬剤処理層が腐朽菌の侵入を防ぐバリアとなり、長期間の供用が期待できる。

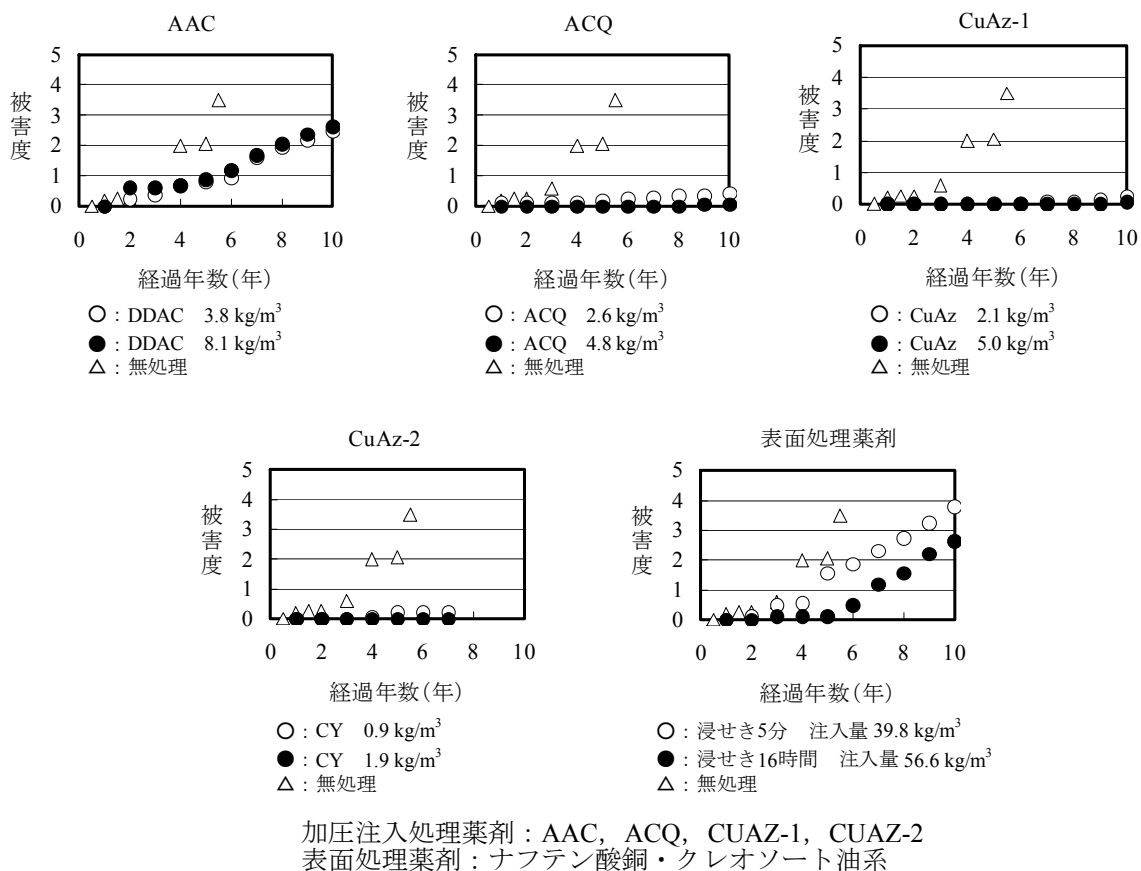


図-3 野外杭試験における各種保存処理木材の耐久性（カラマツ辺材）

図-3に、旭川で行った野外杭試験⁶⁾における各種保存処理木材の耐朽性の一例を示す。無処理（図-3に示す△）の場合は、5～5.5年を経過した時点で被害度2.5、すなわち耐用年数に達している。一方、加圧注入処理では、AAC処理材が、いずれの吸収量（有効成分としての吸収量であり、図-3に示す○または●）の場合も被害度が2.5に達するまで10年を要している。これは、スギ辺材を用いた酒井らの報告⁷⁾と類似した傾向を示している。ACQ処理材では、いずれの吸収量の場合も被害が小さい。これについても、スギ辺材を用いた10年間の杭試験の結果⁸⁾と同様の傾向を示している。CUAZ-1あるいはCUAZ-2で処理した試験体においても、ほとんど被害が見られなかった。ただし、表面処理試験体では、5分間浸せきの場合（○；注入量39.8 kg/m³）が約8年、16時間浸せきの場合（●；注入量56.6 kg/m³）は約10年で被害度2.5に達した。

以上の結果によれば、加圧注入処理を行った場合は、無処理材に比べて少なくとも2倍程度は耐用年数を延長させることが可能と考えられる。また、表面処理でも、1.5倍程度は可能と考えられる。ただし、木橋は複数の部材より構成された構造物であり、上記の結果がそのまま反映されるとは考え難い。このため、保存処理の効果を反映する p_3 の配点は、注入処理と表面処理、および両者の複合について、上記の試験結果を安全側に踏まえて配点した。なお、特に使用する薬剤についての詳細は示してはいるが、JAS、AQ、（社）日本木材保存協会等で規定、認定されている薬剤を使用し、規定の薬剤量が付与されていることを前提とする。

また、材料要因 P の評価のなかで、特に点数としての評価はしていないが、紫外線や金属腐食による劣化防止のために、濃色系の塗装を行うことや、ステンレスまたは亜鉛めっきボルトを用いることを推奨する。

4.2 周辺環境

木材腐朽菌の生育やシロアリの分布には、温度の与える影響が大きいことが知られている。ここでは「木造建築物の耐久性向上技術」¹⁾（以下、木造建築物資料と表記する）に示される地域の劣化外力の評価手法を踏襲し、最新の気温観測データを用いて地域別の腐朽菌の生育条件である e_1 を整理した。

建築物資料では、1日のなかで15℃以上となる時間数の年間積算時間をパラメータとして、表-6に示すように、地域別の係数を算出している。しかし、現在、気象庁が公表しているアメダス⁹⁾観測点867カ所のうち、日平均気温等の詳細なデータがあるのは、県庁所在地などの158カ所であり、その他の観測点では年平均気温しか入手できない。このため、建築物資料の手法に倣い、上記の158カ所について、表-6の区分から得られる腐朽菌の生育条件係数（ e_1 ）と、各地点の年平均気温と全国年平均気温（15.5℃）の比の関係を整理した。その結果、両者には図-4に示すような一定の関係があることが確認できた。このため、残りの709箇所についても、年平均気温と全国年平均気温の比から、地域別の係数を点数化した。

表-6 地域別の腐朽菌の生育条件を示す係数の区分¹⁾

係数の値	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8
15℃以上の年間積算時間	3,520以下	4,700以下	5,900以下	7,050以下	7,050以上

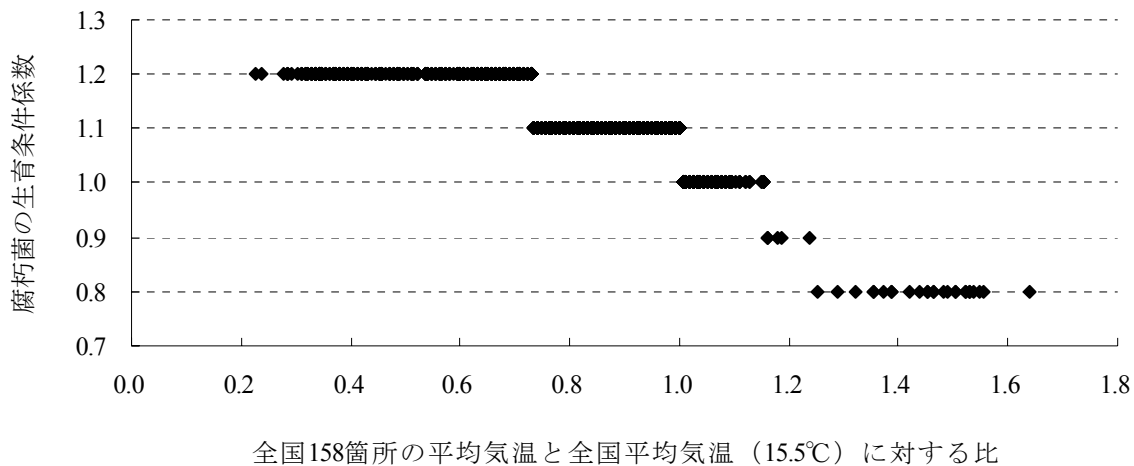


図-4 腐朽菌の生育条件係数と各地点の年平均気温と全国年平均気温の比

表-7は、アメダスデータから年平均気温が得られる全国806カ所の観測点における、年平均気温と全国年平均気温（15.5℃）の比と、腐朽菌の生育条件係数 e_1 の関係を示している。この関係を経緯度でプロットしたものが、 e_1 の計上に用いる図-2である。

なお、腐朽菌によっては、基準温度を変更する必要があると思われるが、地域別の比率としては、同様の傾向を示すと考え、ここでは腐朽菌別の係数の設定は行っていない。

表-7 腐朽菌の生育条件係数

係数	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8
年平均気温 /15.5	0.74 未満	0.74 以上 1.00 未満	1.00 以上 1.16 未満	1.16 以上 1.25 未満	1.25 以上

4.3 構造形式

木材の腐朽は、「水・空気・温度・腐朽菌」を原因とする。屋根は主材を雨に曝されることや、接合部等の部材密接部への水の浸入を防ぎ、腐朽を防止する効果がある。国内外においても、古くから木橋の腐朽対策として屋根を設けることは一般的であり、多くの事例がその効果を証明している。このため、構成要素の s_1 と s_2 において、屋根の有無や、上路橋と中路橋、および下路橋の区分により、その効果を考慮した。

主材の構造形式を反映する s_3 については、桁橋は、他の形式に比べて接合箇所や部材と部材の密着箇所が少なく、かつ、通気性が確保できるため、最上位の点数とした。アーチ橋についても桁橋と同様であるが、構造的な特徴から桁表面積や構造高が大きく、雨の角度によっては曝される頻度が桁橋より大きいため、次点としている。床版橋は、主版を構成する部材と部材が密着し、雨水が滲入した場合に乾燥が妨げられることから、桁橋とアーチ橋よりも低い点数とした。トラス橋は、接合箇所が多く、水が滞留する可能性が高いことや、構造形式上、部材数が多く、かつ、一部分の腐朽が全体構造に与える影響が大きいことから、最も低い点数とした。

床版の構造形式を反映する s_4 については、木床版は、鋼床版やコンクリート床版に比べ低い点数とした。これは、屋根の機能としては同等であるものの、床版の腐朽が主材に伝播することを考慮したものである。また、木床版のうち、歩道橋によく見られる敷板を並べた形式は、屋根の効果が低いと考え、さらに低い点数とした。なお、アスファルト・コンクリート等で舗装する場合は、鋼橋やコンクリート橋と同様に、防水層を設置することを推奨する。

4.4 腐朽防止(構造)

腐朽の要因である「水・空気・温度・腐朽菌」のうち、構造的な工夫によって、ある程度遮断できるものは「水」である。木橋は、橋座付近や接合部において腐朽していることが多く、このような箇所では、水を滞留させない工夫や速やかに排出する工夫、通気性を確保する工夫が重要である。過去に腐朽によって撤去された木橋の多くは、これらの工夫（水仕舞い）がなされていないことが多く、木橋の耐久性を、材料の耐朽性のみ依存することは避けなければならない。また、その限界は、すでに認識されているものと思われる。

雨水を排除することの効果は、屋根の効果から見ても明らかである。このため、腐朽防止のために、構造的に配慮した場合については、耐久性を向上させることが可能と判断し、構成要素 d の点数を割り増すこととした。なお、腐朽防止のための構造的工夫（水仕舞い）の具体については、「木橋技術の手引き2005－木橋の保全」¹⁰⁾を参考として頂きたい。

4.5 腐朽防止(施工)

部材を裸で運搬・仮置した場合、雨水等により、接合用孔等の乾燥や排水が困難な箇所に水分を多く含む場合がある。このような箇所に水分を多く含むことは腐朽の一因となり、部材をシートで覆うといった現場での防水処理や、後加工部の防腐処理は非常に重要である。現場での対応の有無は、既に架けられた木橋においては、施工時の記録や工事写真がなければ判断できず、確認することが難しいものの、新設する場合については、設計者は必ず図面等に上記の内容を記載し、注意を喚起すべきと考える。また、施工者は、完成時には雨水に曝される可能性が低い部材でも、施工時に水分を含む可能性があること、また、前項に示した構造的な工夫は、完成形において水分を浸入・滞留させない、または排水するための工夫であり、当初から水分を多く含んだ場合は、その機能を発揮することは難しいことを十分に認識する必要がある。このため、施工時において腐朽防止に努めることは重要であり、これに配慮した場合は耐久性に寄与するものと判断し、構成要素 c の点数を割り増すこととした。

4.6 保全行為

維持管理は、木橋に限らず、橋梁の延命化に大きく影響する。維持管理の手法には、予防保全と事後保全、簡易保全および、無点検保全があるが、ここでの保全行為とは、予防保全を基本としつつ、事後保全を含めた意味であり、日常的な清掃等を意味する簡易保全や維持管理を行わない無点検保全は、ここでは対象としていない。

保全行為は、腐朽の程度や保全行為のタイミングによって、同種の行為でもその効果は異なることが予想されるが、これを考慮することは現実的には極めて困難であり、行為の有無 m とその回数 n によって表現するものとした。

第5章 耐用年数予測法の検証

5.1 予測法の検討手順

耐用年数の予測式と各影響要因（構成要素）の配点方法は、以下を基本条件としている。

- ①標準条件における指標値 Y を1.0とし、この場合の耐用年数を15年程度とする。
- ②耐用年数の上限は、50年とする。
- ③耐用年数の予測結果が、既存木橋の実態調査結果と整合することを確認する。

ここで、①の標準条件とは、「主材料はスギ、防腐処理なし、平均的な気候、屋根なし、上路桁橋、木床版（敷板）、桁覆等の特別な腐朽対策なし、標準的管理による施工、保全行為なし。」という条件であり、この場合の P 、 E 、 S 、 D 、 C の点数を全て1.0とし、これまでの架橋経験や文献¹¹⁾により、この条件下における耐用年数を15年程度とした。また、同環境下において、スギではなくヒノキ等の耐朽性の高い樹種を用いた場合を20年程度とした。

次に、②の耐用年数の上限は、防腐処理技術の進歩や既存木橋の調査結果等を鑑み、耐朽性の高い材料を使用し、気候条件が良く、屋根または、鋼床版やコンクリート床版等を採用するといった、良好な条件下にある場合は、50年の供用期間が確保できるとしたものである。

そして、③の調査結果は、本委員会事例研究分科会が、平成22年度から平成23年度に実施した、既存の木橋30余橋に対する腐朽調査の結果（以下、既存木橋調査結果と示す。）であり、指標値 Y の算定に用いる影響要因（構成要素）の点数は、これを基本データとして設定した。

以上の基本条件を踏まえ、予測式と構成要素の点数を図-5に示す手順により設定する。

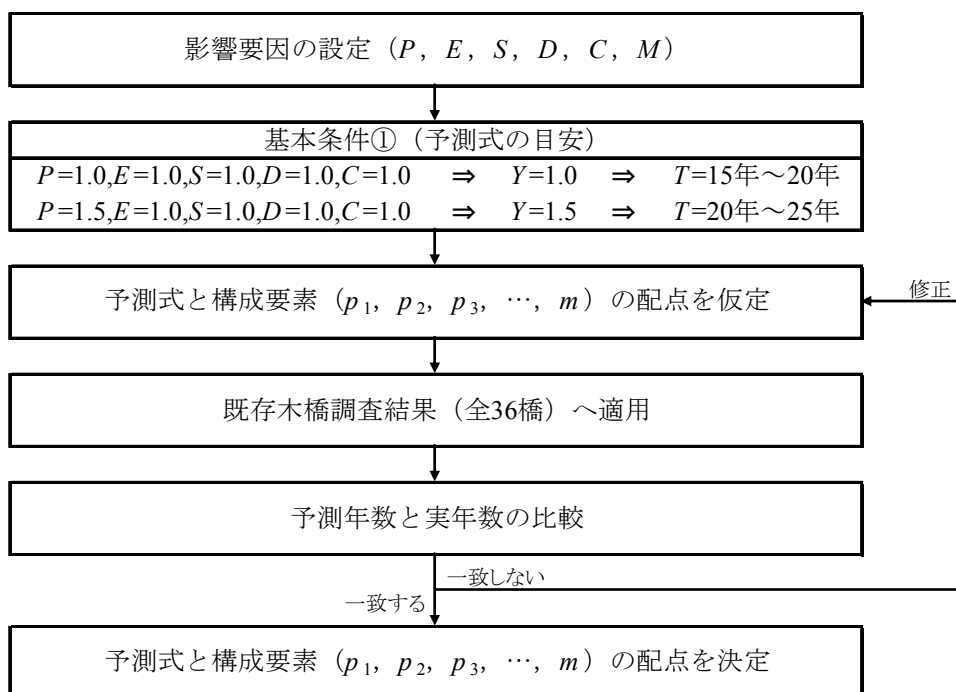


図-5 検討フロー

5.2 予測式の設定

腐朽により撤去された事例は、耐用年数を予測するうえでの確定値として与えられる。このため、構成要素の点数と予測式は、第一に、このような確定値を精度良く反映できることが条件となる。表-8は、次頁以降の表-9(1)から表-9(3)に示している既存木橋の調査結果とそれらの耐用年数の予測結果より、「■；腐朽により撤去または、現在通行止め」となっている事例を抽出したものであり、これらの事例に対する指標値Yと予測年数および、実際の供用期間（実年数）を示している。

また、表-8に示す記号（○または△）は、後に示す図-6に用いるものである。なお、F橋とG橋については、供用期間が非常に長いことから、耐用年数を予測するにあたっては、確定値として用いている。ただし、この2橋は、現在も北海道において供用されているものの、補強のために中間支柱を設けるなどの構造的処理がなされていることから、あくまで参考値として捉える必要がある。

表-8 腐朽事例の指標値Yと実年数

記号	橋名	橋梁概要	指標値 Y	予測年数	実年数	備考
○	A橋 北海道滝川市	ベイマツ、表面処理、 ニールセンローゼ橋(木床版)	1.1	17	17	通行止め
	B橋 北海道滝川市	ベイマツ、表面処理、 斜張橋(木床版)	1.2	19	17	通行止め
	K橋 新潟県加茂市	スギ、防腐処理なし、 桁橋(鋼床版)	1.4	21	22	撤去済
	N橋 千葉県戸田市	ボンゴシ、防腐処理なし、 下路式トラス橋(木床版)	1.2	18	16	通行止め
	Q橋 長野県軽井沢町	カラマツ、表面処理、 中路式ラーメン橋(木床版)	1.8	28	24	撤去済
	R橋 静岡県島田市	スギ、防腐処理なし、 桁橋(木床版)	1.0	15	15	通行止め
	T橋 静岡県静岡市	スギ、防腐処理なし、 桁橋(木床版)	1.5	23	20	通行止め
	Y橋 広島県福山市	ベイマツ、表面処理、 下路式トラス橋(木床版)	0.7	11	13	撤去済
	AD橋 愛媛県北宇和郡	ボンゴシ、防腐処理なし、 下路式トラス橋(木床版)	0.8	13	10	撤去済
	AJ橋 大分県大分市	ボンゴシ、防腐処理なし、 下路式アーチ橋(木床版)	1.1	16	13	撤去済
△	F橋 北海道	カラマツ(推定)、表面処理、 桁橋(Co床版)	2.7	41	68	供用中であるが、 確定値とした。
	G橋 北海道	カラマツ(推定)、表面処理、 桁橋(Co床版)	2.7	41	66	供用中であるが、 確定値とした。

表-9(1) 調査木橋に対する適用表(1)

橋名	竣工年	経過年数	予測年数	Y	使用材料			周辺環境		構造形式				構造	施工	保全行為	
					P1	P2	P3	e1	e2	S1	S2	S3	S4			C	M
A橋 北海道滝川市	1993	17	17	1.1	ペイマツ	ペイマツ	塗布	北海道滝川市	一般	屋根なし	下路	ローゼ	木床版	一般	一般	なし	なし
B橋 北海道滝川市	1993	17	19	1.2	ペイマツ	ペイマツ	塗布	北海道滝川市	一般	屋根なし	下路	斜張	木床版	一般	一般	なし	なし
C橋 北海道札幌市	1993	18	24	1.6	ボンゴシ	ボンゴシ	なし	北海道札幌市	一般	屋根なし	上路	アーチ	木床版	一般	一般	なし	なし
D橋 北海道岩見沢市	1994	17	29	1.9	ペイマツ	ペイマツ	注入	北海道岩見沢市	一般	屋根なし	上路	桁	木床版	一般	一般	再塗装2	なし
E橋 北海道岩見沢市	1999	12	26	1.7	ペイマツ	ペイマツ	塗布	北海道岩見沢市	一般	屋根あり	下路	トラス	木床版	一般	一般	再塗装1	なし
F橋 北海道	1943	68	41	2.7	カラマツ	カラマツ	塗布	北海道	一般	屋根なし	上路	桁	CO床版	一般	一般	不明	不明
G橋 北海道	1945	66	41	2.7	カラマツ	カラマツ	塗布	北海道	一般	屋根なし	上路	桁	CO床版	一般	一般	不明	不明
H橋 秋田県大仙市	1999	12	39	2.6	スギ	スギ	注入+塗布	秋田県大仙市	一般	屋根なし	下路	アーチ	木床版(鋪)	一般	一般	再塗装1	なし
I橋 秋田県山本郡	2001	10	43	2.9	スギ	スギ	注入+塗布	秋田県山本郡	一般	屋根なし	下路	トラス	鋼床版	一般	一般	なし	腐朽補修1
J橋 秋田県大館市	1988	23	35	2.3	スギ	スギ	塗布	秋田県大館市	一般	屋根なし	上路	桁	木床版(鋪)	一般	一般	なし	なし
K橋 新潟県加茂市	1980	22	21	1.4	スギ	スギ	なし	新潟県加茂市	過潤	屋根なし	上路	桁	鋼床版	一般	一般	なし	なし
L橋 石川県加賀市	1987	24	19	1.3	ヒバ	ヒバ	塗布	石川県加賀市	過潤	屋根なし	上路	アーチ	木床版	一般	一般	再塗装1	なし
			24	1.6	1.5	1.1	0.3	1.1	0.7	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.3	0.0

注1)経過年数の■は「撤去(通行止め)までの実年数」、■は「最近の調査により一部に腐朽が確認されたもの」、■は「最近の調査により健全な状態と判断されたもの」を示す。

注2)推定年数とY値の上段は保全行為を考慮していないもの、下段は保全行為を考慮したものを示す。

表-9(2) 調査木橋に対する適用表(2)

橋名	竣工年	経過年数	予測年数	Y	使用材料			周辺環境		構造形式				施工	保全行為	
					P1	P2	P3	e1	e2	S1	S2	S3	S4		C	M
M橋 石川県加賀市	1990	21	24	1.6	ヒノキ 1.5	ヒノキ 0.9	注入 0.6	石川県加賀市 1.1	一般 1.0	屋根なし 1.0	上路 1.0	方杖 0.7	木床版 1.0	一般 1.0	なし 0.0	なし 0.0
N橋 千葉県戸田市	1995	16	14 18	0.9 1.2	ボンゴシ 1.5	ボンゴシ 0.8	なし 0.0	千葉県戸田市 1.1	一般 1.0	屋根なし 1.0	下路 0.8	トラス 0.7	木床版 1.0	一般 1.0	再塗装1 0.3	なし 0.0
O橋 神奈川県横浜市	1996	15	18 23	1.2 1.5	ペイマツ 1.0	ペイマツ 1.0	注入+塗布 1.0	神奈川県横浜市 1.1	一般 1.0	屋根なし 1.0	下路 0.8	トラス 0.7	木床版 1.0	一般 1.0	再塗装1 0.3	なし 0.0
P橋 東京都品川区	1996	15	16	1.1	ボンゴシ 1.5	ボンゴシ 0.8	なし 0.0	東京都品川区 1.0	一般 1.0	屋根なし 1.0	下路 0.8	アーチ 0.9	木床版 1.0	一般 1.0	なし 0.0	なし 0.0
Q橋 長野県軽井沢町	1987	24	10 28	0.6 1.8	カラマツ 1.0	カラマツ 0.9	塗布 0.3	長野県軽井沢町 1.0	湿潤 0.7	屋根なし 1.0	中路 0.8	ラーメン 0.9	木床版 1.0	一般 1.0	再塗装3 0.9	腐朽補修1 0.3
R橋 静岡県島田市	1995	15	15	1.0	スギ 1.0	スギ 1.0	なし 0.0	静岡県島田市 1.0	一般 1.0	屋根なし 1.0	上路 1.0	桁 1.0	木床版 1.0	一般 1.0	なし 0.0	なし 0.0
S橋 静岡県島田市	1986	25	15 29	1.0 1.9	スギ 1.0	スギ 1.0	なし 0.0	静岡県島田市 1.0	一般 1.0	屋根なし 1.0	上路 1.0	桁 1.0	木床版 1.0	一般 1.0	なし 0.0	桁取替3 0.9
T橋 静岡県静岡市	1991	20	23	1.5	ヒノキ 1.5	ヒノキ 0.9	なし 0.0	静岡県静岡市 1.0	一般 1.0	屋根なし 1.0	上路 1.0	桁 1.0	木床版 1.0	一般 1.0	なし 0.0	なし 0.0
U橋 愛知県丹波郡	1996	15	33 42	2.2 2.8	ペイマツ 1.0	ペイマツ 1.0	注入+塗布 1.0	愛知県丹波郡 1.1	一般 1.0	屋根なし 1.0	上路 1.0	桁 1.0	木床版 1.0	一般 1.0	再塗装2 0.6	なし 0.0
V橋 愛知県名古屋市	1993	18	26	1.8	ペイマツ 1.0	ペイマツ 1.0	注入 0.6	愛知県名古屋市 1.1	一般 1.0	屋根なし 1.0	上路 1.0	桁 1.0	木床版 1.0	一般 1.0	なし 0.0	なし 0.0
W橋 滋賀県野洲郡	1995	16	22 27	1.5 1.8	ヒノキ 1.5	ヒノキ 0.9	注入+塗布 1.0	滋賀県野洲郡 1.1	一般 1.0	屋根なし 1.0	下路 0.8	トラス 0.7	木床版 1.0	一般 1.0	再塗装1 0.3	なし 0.0
X橋 岡山県瀬崎町	1997	14	15	1.0	スギ 1.0	スギ 1.0	注入 0.6	岡山県瀬崎町 1.1	一般 1.0	屋根なし 1.0	下路 0.8	トラス(眺) 0.7	木床版 1.0	一般 1.0	なし 0.0	なし 0.0

注1)経過年数の■は「撤去(通行止め)までの実年数」、■は「最近の調査により一部に腐朽が確認されたもの」、■は「最近の調査により健全な状態と判断されたもの」を示す。

注2)推定年数とY値の上段は保全行為を考慮していないもの、下段は保全行為を考慮したものを示す。

表-9(3) 調査木橋に対する適用表(3)

橋名	竣工年	経過年数	予測年数	Y	使用材料			周辺環境		構造形式				構造	施工	保全行為	
					P1	P2	P3	e1	e2	S1	S2	S3	S4			C	M
Y橋 広島県福山市	1990	13	11	0.7	ペイマツ	ペイマツ	塗布	広島県福山市	一般	屋根なし	下路	トラス	木床版	一般	一般	なし	なし
Z橋 高知県高岡郡	2007	4	32	2.2	スギ	スギ	注入+塗布	高知県高岡郡	一般	屋根なし	下路	アーチ	木床版(鋪)	一般	一般	なし	なし
AA橋 高知県高岡郡	1996	15	17	1.1	スギ	スギ	注入+塗布	高知県高岡郡	一般	屋根なし	下路	トラス	木床版	一般	一般	再塗装1	なし
AB橋 高知県香美市	2000	11	32	2.2	スギ	スギ	注入	高知県香美市	一般	屋根なし	上路	方杖	木床版(鋪)	一般	一般	なし	なし
AC橋 高知県高岡郡	2004	7	27	1.8	スギ	スギ	注入	高知県高岡郡	一般	屋根あり	下路	トラス	木床版	一般	一般	なし	なし
AD橋 愛媛県北宇和郡	1990	10	13	0.8	ボンゴシ	ボンゴシ	なし	愛媛県北宇和郡	一般	屋根なし	下路	トラス	木床版	一般	一般	なし	なし
AE橋 香川県仲多度郡	1996	15	13	0.8	ボンゴシ	ボンゴシ	なし	香川県仲多度郡	一般	屋根なし	下路	トラス	木床版	一般	一般	なし	なし
AF橋 宮崎県小林市	1996	15	26	1.8	スギ	スギ	塗布	宮崎県小林市	一般	屋根なし	上路	アーチ	木床版(鋪)	一般	一般	再塗装1	なし
AG橋 熊本県玉名郡	1996	15	17	1.1	イエローパイン	イエローパイン	注入	熊本県玉名郡	湿潤	屋根なし	上路	桁	木床版	一般	一般	なし	なし
AH橋 福岡県北九州市	1995	16	23	1.5	ボンゴシ	ボンゴシ	なし	福岡県北九州市	一般	屋根なし	上路	桁	木床版	一般	一般	再塗装1	腐朽補修1
AI橋 福岡県北九州市	1994	17	20	1.4	ボンゴシ	ボンゴシ	なし	福岡県北九州市	一般	屋根なし	上路	アーチ	木床版	一般	一般	なし	なし
AJ橋 大分県大分市	1998	13	16	1.1	ボンゴシ	ボンゴシ	なし	大分県大分市	一般	屋根なし	下路	アーチ	木床版	一般	一般	なし	なし

注1)経過年数の■は「撤去(通行止め)までの実年数」、■は「最近の調査により一部に腐朽が確認されたもの」、■は「最近の調査により健全な状態と判断されたもの」を示す。

注2)推定年数とY値の上段は保全行為を考慮していないもの、下段は保全行為を考慮したものを示す。

図-6は、表-8に示した指標値 Y と実年数の関係（図中○および△で示す）と、提案する予測式を示したものである。

予測式は、指標値 Y と実年数との関係を近似することで設定するが、近似の方法としては、図-6に示すように、線形近似や指数近似等が考えられる。しかし、指標値 Y が2.0以上となるような木橋は、現在供用中であるものが多く、確定値としてのデータが多くは得られていない。加えて、指数近似では、指標値 Y の僅かな増加にも耐用年数 T が敏感に反応することから、現段階では確定値に重きを置き、線形近似で表現することとした。また、近代木橋の歴史が浅いこともあり、長期間供用した事例についても多くは得られていない。ただし、図-6の△に示す北海道の事例や、前述の基本条件②に示した内容を踏まえ、ここでは、耐用年数の上限を50年と設定した。

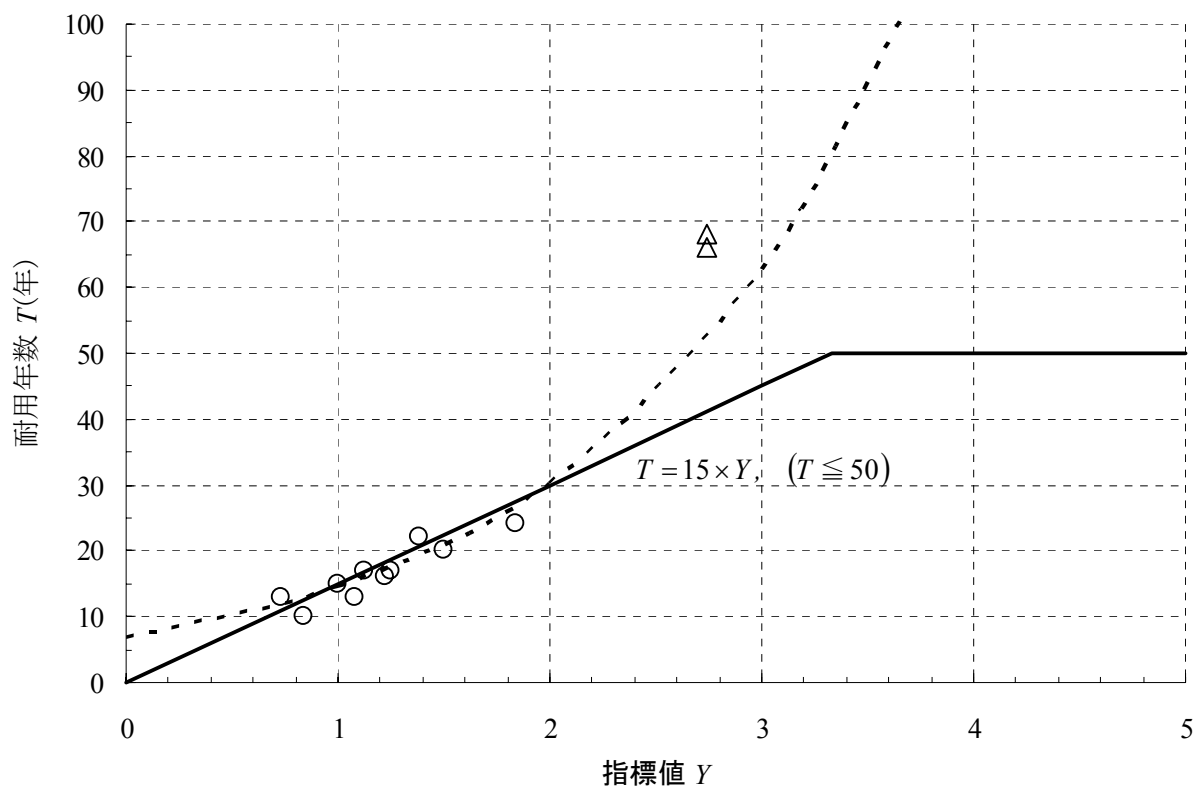


図-6 予測式の検討

5.3 供用中の木橋との関係

耐用年数の予測式は、表-8に示した確定値を基本として設定しているが、現在供用中の木橋の使用状態からも、その精度をある程度は確認できる。図-7(1)と図-7(2)は、表-9(1)から表-9(3)に示した既存木橋の調査結果とそれらの耐用年数の予測結果において、「■；一部に腐朽が確認されたもの」と「■；健全な状態」に評価された事例を抽出したものであり、それぞれの事例に対し、現在までの経過年数と予測年数（保全行為を考慮しない）、および、保全行為を考慮した場合の予測年数を示している。

図-7(1)に示す「一部に腐朽が確認されたもの」と評価された木橋の場合、概ね経過年数に対し、予測年数が若干上回る結果が得られている。また、図-7(2)に示す「健全な状態」と評価された木橋の場合には、予測年数が経過年数を上回る結果が得られている。これらが、予測法の妥当性を直接的に確認できる結果とはなり得ないが、概ね供用状態を評価できていることから、提案する予測式が、ある程度の精度を有していることは認められる。

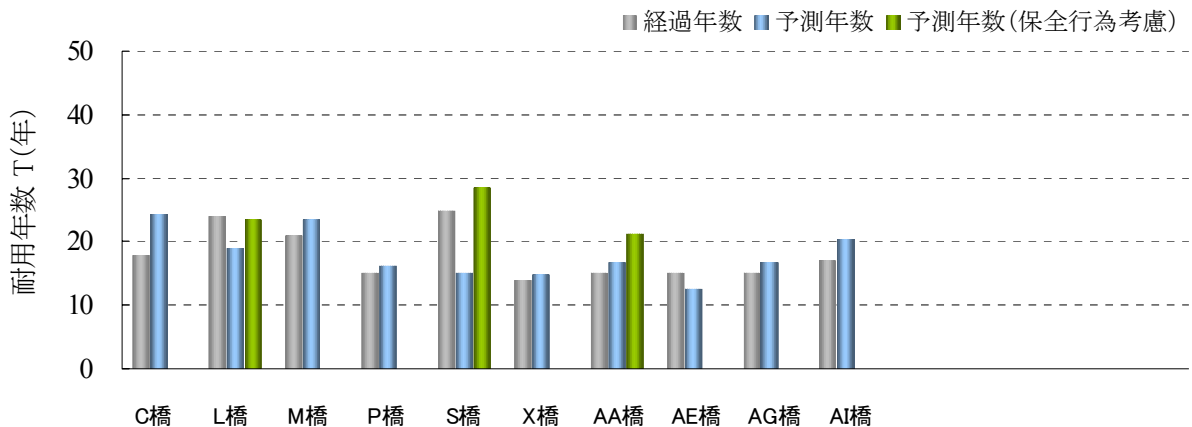


図-7(1) 供用中の木橋への適用（‘一部に腐朽が確認された’ と評価された木橋の場合）

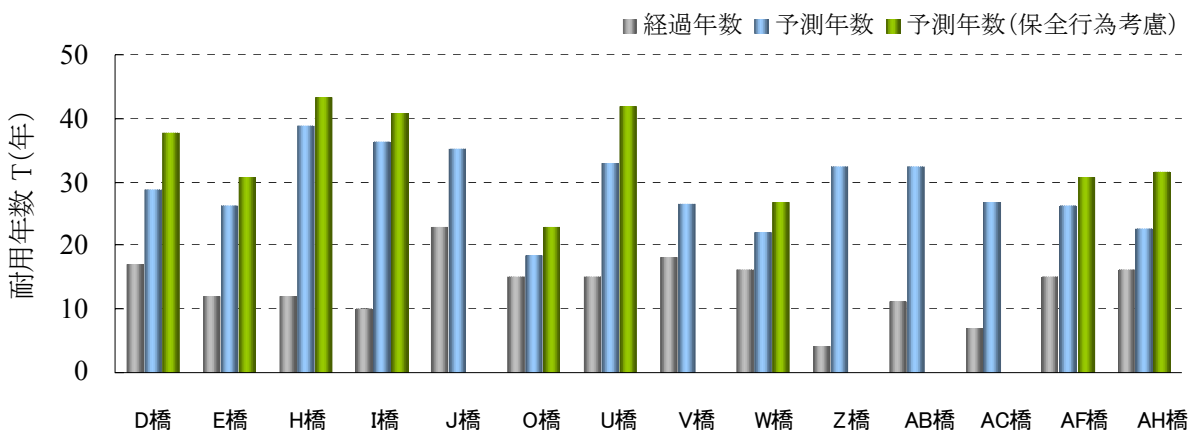


図-7(2) 供用中の木橋への適用（‘健全な状態’ と評価された木橋の場合）

第6章 まとめ

木橋の耐用年数の予測法は、信頼性設計における最適な設計供用期間を設定することや、維持管理において、適切な指標となることを目的としている。ここに示した影響要因（構成要素）の配点は、既存木橋の調査結果に基づくものであるが、使用材料や周辺環境等、各要因の相関性や重みを定量的に評価するまでには至らず、現段階では定性的な点数評価と言わざるを得ない。予測精度を向上させるためには、統計的処理ができる程度のデータ数が必要となるが、各要因の相関を導き得るデータ数を確保するためには長い年月を要し、また、これを確保できたとしても、自然材料を用いた木橋の耐用年数を正確に評価することは、現実的には難しいかもしれない。ただし、予測法の構築の目的である、設計と維持管理の指標という意味からは、予測精度には、ある程度の誤差が許容できる。

信頼性設計における設計供用期間は、予測される供用期間よりも長めに設定することが安全側となる。一方、維持管理の指標として用いる場合は、予測される供用期間は、短めに設定することが安全側となろう。予測と実際との差は、当然0であることが望ましいが、将来的にも0とすることは、おそらくはできない。このため、現在および将来においても、予測値には、その用途によって、ある程度の余裕を与える必要があり、予測した耐用年数と実際の耐用年数の誤差が5年程度であれば、実用的観点からは、十分に適用に値する。

木橋の耐用年数の予測法は、現段階では構築の途上である。しかし、現在収集したデータの範囲内では良質な精度が得られていることから、参考値として扱うことは可能と判断する。今後、さらなる予測精度の向上を図るためには、同一のフォーマットによって、継続的にデータを収集・整理・分析することが重要であり、これにより、木橋計画の進展と信頼性の向上が図られる。

第7章 おわりに

本巻は、限界状態設計において最適な設計供用期間を設定することと、木橋の維持管理において適切な指標となることを目的として、耐用年数の予測方法について取りまとめたものである。今後、早急に検討すべき課題としては、近代木橋に使用されることの多い、集成材の効果を考慮することを考えている。

現在提案している予測法では、製材と集成材は、材料として区別をしていない。主材（主桁等の主構造部材）に製材を用いると、おのずと適用可能な長さが制限され、木口面や接合部の数が増し、これにより腐朽の進行を早めかねない。この点において、長大材を可能とする集成材は、腐朽の可能性を低減することからも有利となる。また、集成材は、その断面を構成するひき板（ラミナ）の含水率を15%以下として製作される。このひき板の段階で防腐剤を加圧注入し、再乾燥後に接着積層すると、ほぼ完全な防腐処理材となり、国内ではアーチ橋やプレストレス木床版に採用されたこともある。今回の検討では、集成材を用いることによる効果、すなわち、長大材を製作することによる木口面の減少等の構造的効果と、ラミ

ナ段階からの防腐処理といった材料的効果等を加算要因として含めていないが、今後の継続的な研究により、これらの効果を明らかにすべきと考えている。また、上記以外にも、多くの課題は残されているであろう。本巻を手にとられた各位には、信頼性の高い予測法の構築のため、ひいては、より良い木橋の計画・保全のため、ご指摘やご指導を賜りたい。

参考文献

- 1) 建築物耐久性向上技術普及委員会：木造建築物の耐久性向上技術，技報堂，1986.
- 2) 三上市蔵，本郷奈保，三上卓：木車道橋における部材の耐用年数の予測，第6回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp.99-104，2007.
- 3) 荒木昇吾：腐朽事例に基づく木橋の耐用年数の推定に関する研究，第7回木橋技術に関する論文報告集，pp.135-140，2008.
- 4) 今村祐嗣：木材保存学入門改訂版，日本木材保存協会，2001.
- 5) 石田英生：木材保存学入門改訂2版，日本木材保存協会，2005.
- 6) 森満範，宮内輝久，杉山智昭：旭川暴露試験地における野外耐朽性試験-保存処理された杭材の野外耐朽性，日本木材加工技術協会第25回年次大会講演要旨集，pp.61-62，2007.
- 7) 酒井温子，岩本頼子，中村嘉明：日本農林規格認定の木材保存薬剤を加圧注入した杭の被害経過，木材工業，第56巻，pp.17-22，2001.
- 8) 桃原郁夫，西村健，大村和香子：森林総合研究所第2樹木園における杭試験(1)防腐処理杭の10年間の被害経過，第54回日本木材学会大会研究発表要旨集，p.385，2004.
- 9) 気象庁：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，2011.9.
- 10) 土木学会鋼構造委員会木橋技術小委員会：木橋技術の手引き2005，pp.228-237，2005.
- 11) 足立洪：わかりやすい橋梁設計計算例及び解説，工学出版，1968.