

1. 木橋の修復限界状態設計法と耐用年数予測

1.1 はじめに

平成14年3月に国土交通省は「土木・建築にかかる設計の基本」を策定し、ISOを意識して我が国の構造設計に対する基本方針を明確にした。更に、今後構造物の設計基準を作成する際は、限界状態設計法に従うよう基準作成者に要請している。(社)土木学会鋼構造委員会木橋技術小委員会(平成17年活動終了)が取りまとめた「木橋技術の手引き2005」はこの「土木・建築にかかる設計の基本」の精神を反映させているが、もう一つの限界状態である「修復限界状態」を考慮したものではなかった。修復限界状態とは、橋梁が損傷を受けて使用が困難になった場合でも、妥当なコストで修復すれば使用可能となる限界状態と定義される。土木・建築にかかる設計の基本では、修復限界状態は地震により損傷を受けた状態を主として想定している。しかしながら、木橋においては供用中に損傷を受けるケースとして、腐朽による部材の劣化が極めて重要であり、これを無視することはできない。木部材が腐朽しないよう配慮する設計に加えて、腐朽個所を「修復」して木橋を延命化する考え方が必要となってくる。

木橋の修復限界状態を考慮した設計を行うためには、その木橋の耐用年数を推定しておく必要がある。設計供用期間より以前に修復が必要となった場合には、修復を行いながら設計供用期間の間、継続使用する。すなわち、1回または複数回の修復(信頼性指標 β を増大させるような補修)を行いながら使用を継続する。我が国の近代木橋の歴史は浅く、耐用年数を推定するための十分なデータが得られていないため、修復限界状態設計を精度良く実施することは今後の課題となろう。本章では、現時点における修復限界状態設計法や耐用年数を考慮した設計法の考え方を示す。図-1.1.1は木橋の信頼性指標 β が時間の経過と共に変化する様子を表したものである。ここで、修復年限とは橋梁完成時または前回の修復時から次の修復までの期間を表す。また、耐用年数とは性能低下、材料劣化に伴う寿命(物理的耐用年数)を意味するものとする。設計供用期間とは設計時にあらかじめ設定しておく橋の供用期間である。

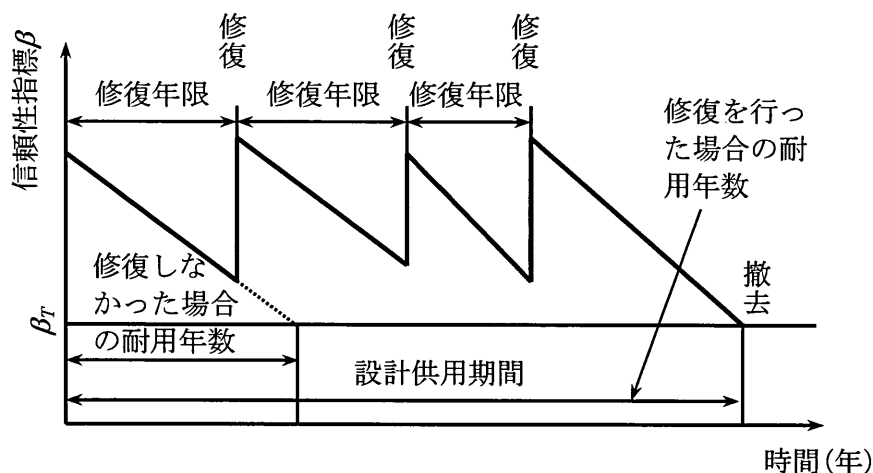


図-1.1.1 β の時間的变化

限界状態設計法によれば、安全性に対する定量的評価と、個々の構造物に要求される供用期間に応じた設計が可能となる。目標とする設計供用期間と実構造物の耐用年数の差が大きければ、得られる安全性は過大ともなり、過小ともなる。したがって、計画段階で耐用年数を精度良く推定することが不可欠である。耐用年数が精度良く推定されれば、安全性に対する信頼性が向上することに加え、ライフサイクルコストや維持管理計画、費用配分（事業計画）の妥当性が確認できると思われる。

耐用年数を推定することは、言い換えれば、耐久性を損なう要因を定量的に評価することである。例えば、コンクリート橋の場合は塩害・アルカリ骨材反応・中性化等の発生メカニズムや進行速度等がある程度把握され、耐用年数の推定に寄与している。木橋の場合、その耐久性を損なう特徴的な要因は腐朽である。木材の腐朽は気温・湿度・腐朽菌の生育域等の環境要因、使用する樹種・防腐剤等の材料要因、その他、構造形式や水仕舞い、維持管理手法等が複雑に関係することで顕在化する。したがって、木橋の耐用年数を推定するためには、これら多種多様な要因の腐朽に対する影響度を定量的に評価し、これまでの腐朽事例をもとに、その妥当性を確認しなければならない。

1.2 修復限界状態を考慮した設計手順

(1) 予め修復を設定する場合の限界状態設計

①当初の設計

当初の設計は、「木橋技術の手引き2005」^{1,2,1)}にしたがって行う。つまり、設計供用期間をT年、ターゲットとする信頼性指標を β_T として、手引きで示されたフォーマットにしたがい、次式を満たす部材断面や接合部の仕様を決定する。

$$\sum \gamma_i \cdot Wn_i \leq \phi \cdot Rn \quad (1.2.1)$$

(ϕ : 耐力係数、 Rn : 耐力効果の公称値、 γ_i : 荷重係数、 Wn_i : 荷重効果の基本値)

式(1.2.1)における耐力や荷重は、モーメントなどに変換された効果となっていることに注意されたい。

荷重継続時間の影響（以後のDOLの影響と呼ぶ）など、経年的に耐力の減少を生じさせる要因を考慮するならば、限界状態設計に限らず、許容応力度設計においても、当初は過剰設計である。例えば、 $\beta_T=3.0$ で設計した場合、 $T=50$ 年とすると、図-1.2.1に示したように、DOLの影響を考慮するため、荷重組み合わせD+Tでは初期の β は $\beta_0=3.9$ である。つまり、DOLの影響係数を基準強度に乗じて減ずるため、その分断面が大きくなり、当初は β_T より大きな値となるが、このことは許容応力度設計でもまったく同じであり、限界状態設計が許容応力度設計^{1,2,2)}に比べ不利と言うわけではない。

そこで、修復することにより、木橋全体または木橋を構成する構造要素の信頼性指標 β の値を増加させることを考えれば、初期の β を β_T より小さくし、それにより初期コストを押さえ、予め設定した時間が経過したら修復を行い、 β を増加させることにより、供用期間を増

すことができると考えられる。これを模式的に表したのが、図-1.2.2である。点線は修復しない場合の β であり、実線は予め設定した年数を経た後修復して使用する場合の β である。

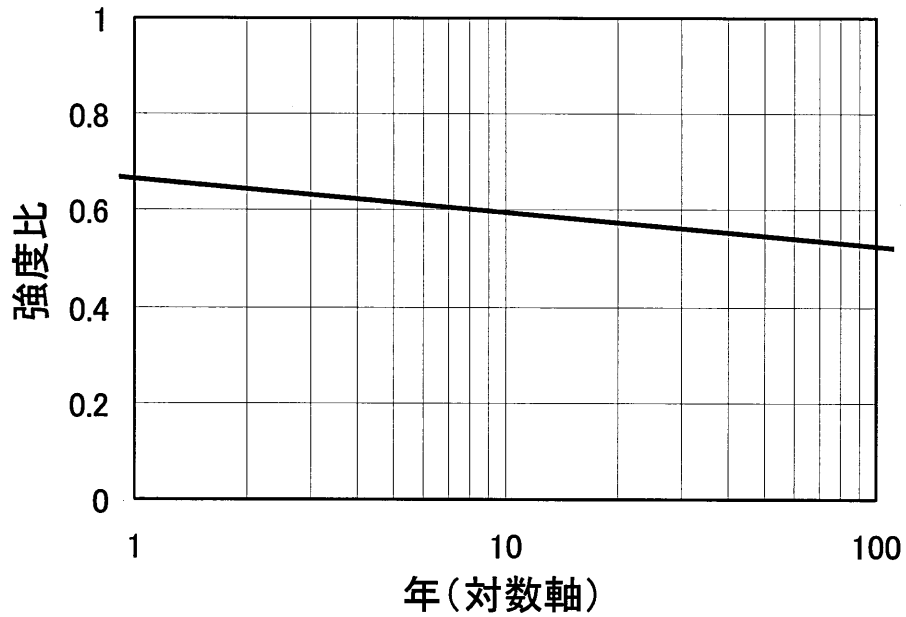


図-1.2.1 強度比と荷重継続時間の関係

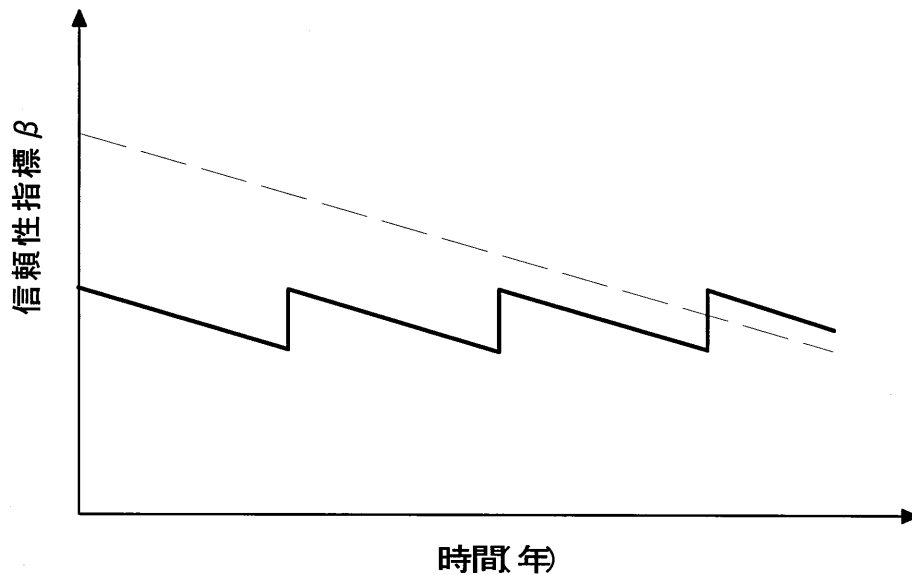


図-1.2.2 修復限界状態設計による β の変化

(注)点線：修復しない場合の β 、実線：修復する場合の β

②修復時点での設計

②-1 修復時点での信頼性指標 β の算出

調査により腐朽などが発見され、剛性や耐力に影響を及ぼす断面欠損の割合などを非破壊的に推定することになる。例として、終局限界状態設計の場合を考えよう。式(1.2.2)に示す

ように有効断面二次モーメントを I_e 、部材の基準強度を σ_n とし、これを用いて耐力 M_e を求める。このとき、便宜上もとの断面係数 Z に低減係数 α を乗じて、有効断面係数が算定できると考えると、次式で表すことができる。

$$M_e = \frac{I_e}{y} \sigma_n = \alpha \cdot Z \cdot \sigma_n \quad (1.2.2)$$

例えば、荷重の組み合わせとしてD+Tの場合、性能関数 Z は次式で表される。

$$Z = \alpha Z \sigma_n - (M_D + M_T) \quad (1.2.3)$$

「木橋技術の手引き2005」では、木材・木質材料の強度分布は2Pワイブル分布、死荷重の分布は正規分布、T 荷重の分布はグンベル分布としているので、AFOSM法によりこのときの信頼性指標 β_T を求めなければならない。

同手引きでは、T 荷重については、交通量が比較的少ない場合には、設計供用期間を t 年とした t 年最大値分布関数 $F_t(x)$ は

$$F_t(x) = [F(x)]^{n+365} = \exp \left[- \exp \left[-0.07 \left(x - 2.56 - \frac{\ln(n \cdot t \cdot 365)}{0.07} \right) \right] \right] \quad (1.2.4)$$

と表せる。また、死荷重は正規分布としているので、その分布関数 $F_D(x)$ は次のように表せる。

$$F_D(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] dx \quad (1.2.5)$$

例えば、死荷重を(木材+鋼材+舗装)とした場合、平均値 $\mu = 3.74 \text{ kN/m}^3/\text{m}^2$ 、標準偏差 $\sigma = 0.13 \text{ kN/m}^3/\text{m}^2$ (変動係数=0.035) である。また、耐力の分布は 2P ワイブル分布であり、変動係数を 0.20 とすると、その分布関数 $F_R(x)$ は次式で表される。

$$F_R(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta} \right)^{5.80} \right] \quad (1.2.6)$$

η は耐力の平均値に依存しており、どの等級を選ぶかで異なるので、ここでは η と表記しておく。

調査の結果、式(1.2.2)における α が0.9と算定されたとする。このときの信頼性指標 β を算出してみよう。まず、手引きよりD+Tの組み合わせにおける設計式は次式である。

$$0.98D_n + 1.50T_n \leq 0.53R_n \quad (1.2.7)$$

式(1.2.3)と式(1.2.7)を見比べれば、式(1.2.7)の左辺の耐力が α だけ低減されたと見ることができる。そこで、この時点での β_T は次のようにして算出できる。式(1.2.4)～(1.2.6)における設計値での累積確率の値を正規化し、それらの二乗和の平方根を求めれば β_T となる。正規化は、平均0、標準偏差1の標準正規分布関数 Φ の逆関数を使って求めることができ、Excel ではNORMSINV(・)で算出できる。これより、耐力の場合、耐力が α だけ低減されるわけである

が、設計上は式(1.2.7)にしたがい断面算定を行うので、式(1.2.7)の右辺にそのまま α を乗じてしまうと、断面が大きくなり、その分信頼性指標 β は大きく算定されることになる。したがって、 α 低減されるということは、信頼性指標 β と言う観点からは、逆に $1/\alpha$ 耐力を増加させることと等価であると考えることができる。つまり、耐力、死荷重、T荷重の設計値はそれぞれ、 $0.53R_n/0.9$ 、 $0.98D_n$ 、 $1.50T_n$ であり、これらの正規化された値はそれぞれ、3.78、0.029、-0.178と算出され、それらの二乗和のルートは3.79となる。つまり、当初の3.9から3.79と減少したことが分かる。図-1.2.3に低減係数 α と信頼性指標 β の関係を表した。

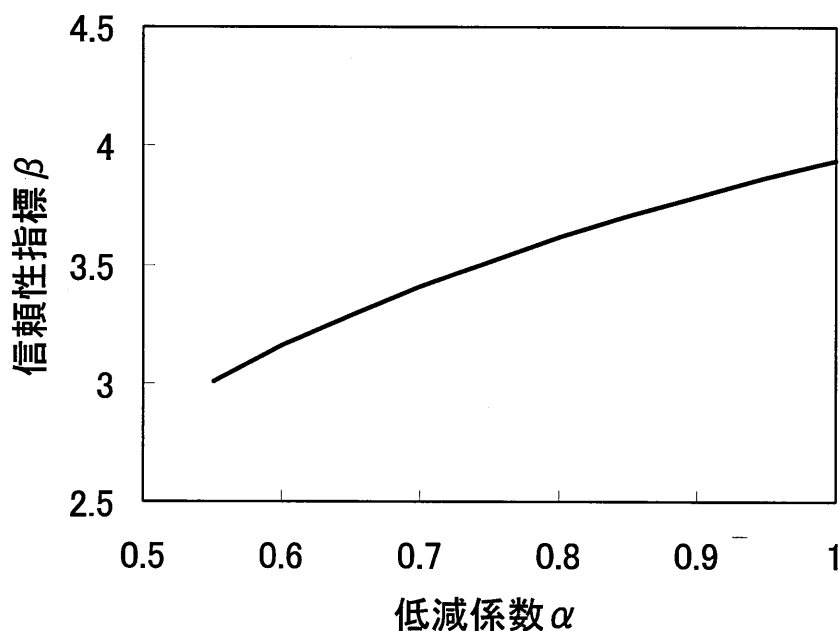


図-1.2.3 低減係数 α と信頼性指標 β の関係

②-2 β_T となるときの低減係数の算出

それでは、当初設定した $\beta_T=3.0$ となる α の値はいつくであろうか？これを求めると、約0.55と算定される。つまり、曲げ強度の場合には、断面係数の低減係数 α が0.55と算定されたとき、修復すればよいことになる。しかし、実は $\alpha=0.55$ となるのは当たり前で、図-1.2.1で示したように、設計期間50年の場合、荷重継続時間の影響が0.55であるから、低減係数の値も同じとなるのである。

と言うことは、この α にも荷重継続時間の影響を考慮しなければならない。つまり、図-1.2.1より、調査を行った時点の経過年数から荷重継続時間の影響係数 k_{DOL} を α に乗じた数値が真の低減係数となる。例えば、20年経過時点での K_d は0.59くらいである。したがって、この時点での α の値が $0.55/0.59=0.93$ となった時点で修復することになる。

②-3 修復時点での断面および接合部の設計

修復は残りの年数を考慮して β を決め、手引きのフォーマットに従い断面を決めればよい。

(2) 予め修復を設定しない場合の限界状態設計

設計・計画の段階で予め修復することを考えていなかったり、あるいは、予定していた修復年限よりも早い段階で腐朽などにより耐力が低下し、修復をせざるを得なくなったりする場合もある。このような状況を模式的に表したのが、図-1.2.4である。

設計式のフォーマットは、上述した式(1.2.1)と同じであるが、重要なことは修復するまでの時間であり、これにより荷重・耐力係数が異なってくるので注意を要する。

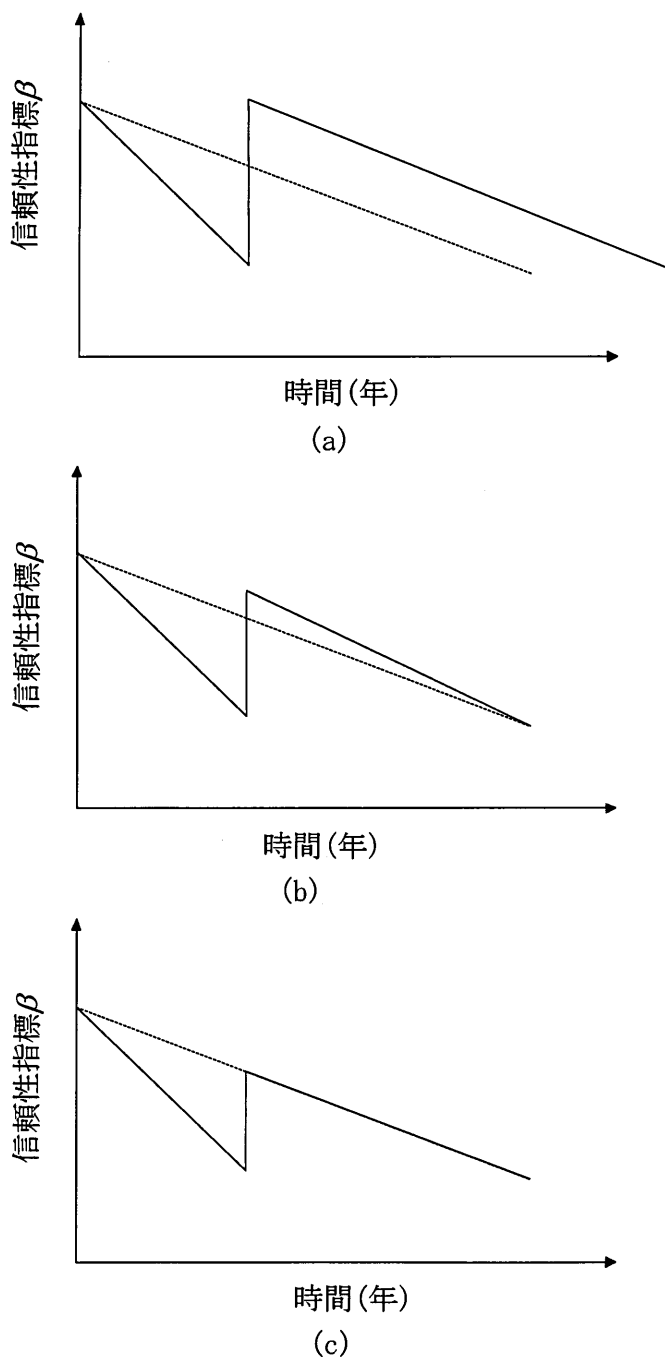


図-1.2.4 修復限界状態設計による β の変化

- (注) 点線 : 修復しない場合の β 、実線 : 修復する場合の β
(a) : 修復時に当初の β とし、設計供用期間よりも長く用いる場合
(b), (c) : 修復時に当初の β とほぼ同様の β とし、設計供用期間と同じくする場合

1.3 耐用年数に影響する要因

本節以降に示す耐用年数の推定方法は、木造建築物の耐用年数の推定方法^{1.3.1)}や木橋の耐用年数に関するこれまでの研究成果^{1.3.2),1.3.3)}を参考として、木橋特有の要因を加味し各種の要因を点数評価して評価式に代入することで推定値を導くものである。ただし、ここでの耐用年数は腐朽と蟻害に関するものであり、地震や豪雨等の天災や輪荷重の影響等による経年的な損傷・劣化は考慮していないことに留意する。

木橋の耐用年数を推定するにあたり、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。橋梁部材のなかで、耐久性に大きく影響を与える部材は、主材の他、輪荷重の影響を直接受ける床版や吊り橋等であれば主ケーブル、また、下部工等も挙げられる。ただし、耐久性を損なう要因を腐朽と蟻害に限定していることや、床版についてはコンクリート床版や鋼床版等、木床版以外の材料が使用されている場合も多く、主材に比べると取替えや補修が容易であること、近年では下部工はコンクリートで造られることが多いこと等から、ここでは主材のみを対象とした。

表-1.3.1は、耐用年数（腐朽・蟻害）に影響する要因を示している。ここでは、橋梁を供用するに至る、計画から設計、施工、維持管理の一連の過程において要因を設定した。

表-1.3.1 耐用年数に影響する要因

要因	概要	記号
使用材料	材料の選択、防腐剤の注入・塗布等、部材の防腐処理に関するもの。	[P]
周辺環境	湿度分布や腐朽菌の生育区分等、対象の立地に関するもの。	[E]
構造形式	桁橋や床版橋、床版の種別等、上部工の構造形式に関するもの。	[S]
設計計画	橋座部の水処理や防水シートの設置等、水仕舞いに関するもの。	[D]
施工方法	部材の仮置時の雨水や湿気対策等、施工時の保全方法に関するもの。	[C]
維持管理	点検の有無や頻度等、維持管理手法に関するもの。	[M]

1.4 耐用年数の推定

(1) 耐用年数の推定方法

木橋の耐用年数は、表-1.3.1に示した要因を点数化し、式(1.4.1)または、式(1.4.2)に代入することで得られる指標値Yにより、図-1.4.1を用いて推定する。なお、当初設計段階での推定耐用年数は維持管理[M]を考慮しない。また、点数の計上方法は後項において詳述する。

$$Y=[P] \times [E] \times [S] \times [D] \times [C] \quad (1.4.1)$$

$$Y=[P] \times [E] \times [S] \times [D] \times [C] \quad (+[M]) \quad (1.4.2)$$

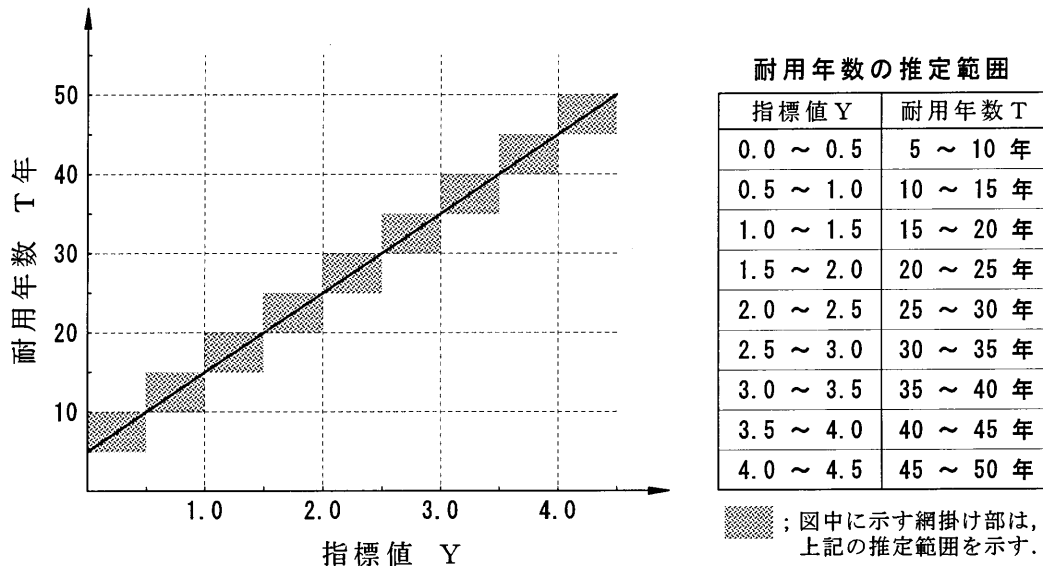


図-1.4.1 指標値 Y と耐用年数の関係

(2) 各要因の評価点

耐用年数に影響する要因は、表-1.4.1に示すように細別しそれぞれに点数を与える。各要因の評価点はそれらから計算され、得られた評価点を式(1.4.1)、式(1.4.2)に代入することで指標値Yを算出する。なお、 p_1 や p_2 等、細別した要因の詳細や配点は、後項で詳述する。

表-1.4.1 各要因の評価点の算出

要 因		要 因 の 細 別		要因の評価点
使用材料	P	材料耐朽性能点	p_1 表-1.4.2	$P = p_1 + p_2 \times p_3$
		防腐剤浸透性能点	p_2 表-1.4.3	
		防腐処理点	p_3 表-1.4.4	
周辺環境	E	蟻害地域区分点	e_1 表-1.4.5&図-1.4.2	$E = e_1 \times e_2 \times e_3$
		腐朽菌生育区分点	e_2 表-1.4.6&図-1.4.3	
		湿度地域区分点	e_3 表-1.4.7&図-1.4.4	
構造形式	S	橋梁形式点(1)	s_1 表-1.4.8	$S = s_1 \times s_2 \times s_3$
		橋梁形式点(2)	s_2 表-1.4.9	
		床版形式点	s_3 表-1.4.10	
設計計画	D	防腐計画点	d 表-1.4.11	$D = 0.60 + \Sigma d$
施工管理	C	施工管理点	c 表-1.4.12	$C = \Sigma c$
維持管理	M	維持管理区分点	m 表-1.4.13	$M = N \times m$

(3) 細別した要因の配点

各要因の評価点は、使用材料や架橋地点等の個別の情報に応じて、表-1.4.2～表-1.4.13、図-1.4.2～図-1.4.4に示す点数を抽出し、表-1.4.1に示した計算式により算出する。

表-1.4.2 材料耐朽性能点 p_1

1.50	ヒノキ, ヒバ, クリ, ケヤキ, ホンソウシ
1.00	ベイマツ, スギ, カラマツ, クスギ
0.95	アカマツ, クロマツ, モミ
0.90	トドマツ, エゾマツ, クスノキ

表-1.4.3 防腐剤浸透性能点 p_2

1.20	ヒバ
1.00	スギ, アカマツ, クロマツ, モミ, ベイマツ
0.95	ヒノキ, エゾマツ, トドマツ, ケヤキ
0.90	カラマツ, クスノキ, クリ, クスギ, ホンソウシ

表-1.4.4 防腐処理点 p_3

0.60	加圧注入処理
0.20	表面塗布処理
0.00	防腐処理なし

表-1.4.5 蟻害地域区分点 e_1

1.10	シロアリなし
1.00	ヤマトシロアリのみ
0.90	ヤマトシロアリとイエシロアリ

表-1.4.6 腐朽菌生育区分点 e_2

1.10	15℃以上 150日/年 以下
1.00	15℃以上 200日/年 以下
0.90	15℃以上 200日/年 以上

表-1.4.7 湿度地域区分点 e_3

1.10	65%/(4月～10月) 以下
1.00	70%/(4月～10月) 以下
0.95	75%/(4月～10月) 以下
0.90	75%/(4月～10月) 以上

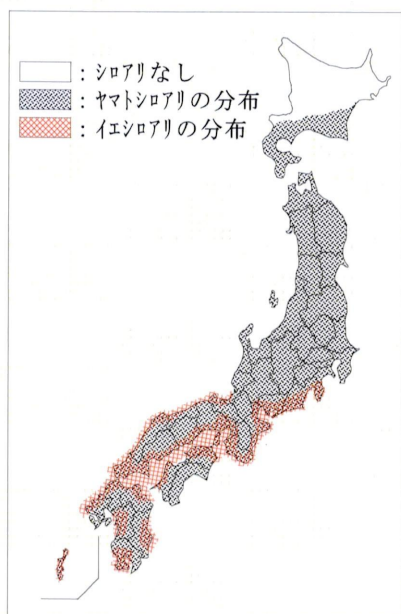


図-1.4.2 蟻害地域区分

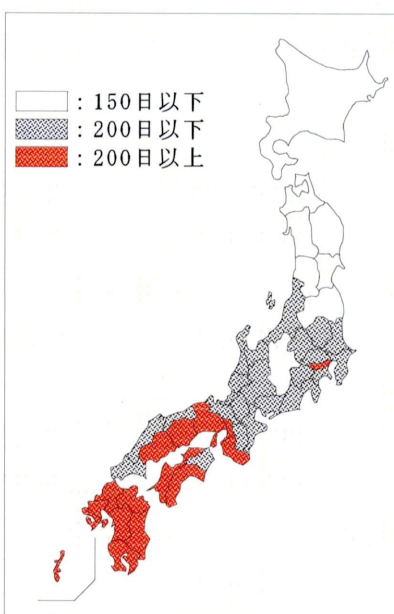


図-1.4.3 腐朽菌生育区分

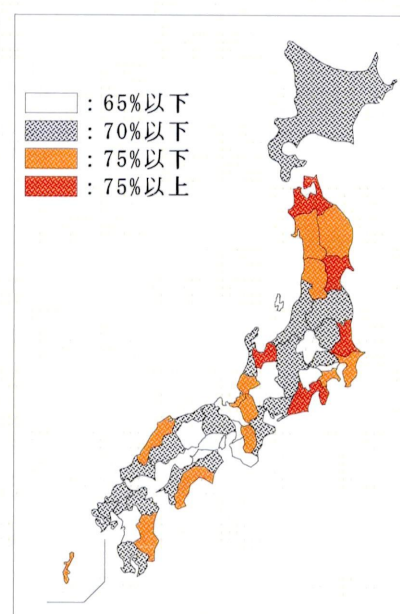


図-1.4.4 湿度地域区分

表-1.4.8 橋梁形式点(1) s_1

1.00	上路橋
0.90	下路橋

表-1.4.9 橋梁形式点(2) s_2

1.00	桁橋
0.97	アーチ橋
0.95	床版橋
0.80	トラス橋

表-1.4.10 床版形式点 s_3

1.10	鋼床版・コンクリート床版
1.00	木床版(舗装あり)
0.95	木床版(敷き板等)

表-1.4.11 防腐計画点 d

0.40	主材の防水処理
0.10	床版の防水処理
0.10	排水装置の設置
0.10	橋座の排水処理
0.00	特に対策を行わない

表-1.4.12 施工管理点 c

0.10	雨露/湿気からの保護
0.10	後加工部の防腐処理
1.00	標準管理による施工

表-1.4.13 維持管理区分点 m

0.30	予防保全
0.20	事後保全
0.05	簡易保全
0.00	無点検保全
N	保全回数

(4) 配点に関する基本条件

各要因の評価点は、以下の①～④の基本条件に基づき決定した。

- ①標準条件を $Y=1.00$ とし、この場合の耐用年数を10～15年とする。
- ②耐用年数の上限を50年程度とする。
- ③耐用年数の下限を5～8年程度とする。
- ④耐用年数の推定結果が腐朽事例と概ね整合することを確認する。

①の標準条件とは、「主材料はスギを用いる、防腐処理は行わない、立地や気象条件等が平均的、上路桁橋（主桁が床版により雨露に直接曝されない）、問題なく施工された、維持管理は行わない。」条件であり、この場合の[P]、[E]、[S]、[D]、[C]の点数を全て1.00とし、これまでの架橋経験や文献^{1.4.1)}により、この条件下における耐用年数を10～15年とした。また、同環境下において、スギではなくヒノキやボンゴシ等を用いた場合を15～20年とした。

②の耐用年数の上限は、現段階では期待値として捉える必要があるが、防腐処理技術の進歩や供用中の木橋の調査結果等を鑑み、高耐朽材料使用・良環境下（指標値Yの最高点）においては50年程度供用できるものと考えた。

③の耐用年数の下限は、腐朽試験の資料^{1.4.3)}に基づいている。この腐朽試験は、30mm×30mm×600mmの心材を地中に埋め込み、樹種別の地際部の腐朽年数を測定したものであり、スギで5～6.5年、ヒノキで7～8.5年の結果が得られている。ここで、木橋は屋外構造物ではあるが橋台等により地面からは離れていることや、風の通り道である河川や峡谷に架けられることから、埋込試験の状況に比べて腐朽の可能性は低いと考え、低耐朽材料使用・悪環境下（指標値Yの最低点）においては7～8年程度供用できると考えた。

④の腐朽事例は、後節に示す腐朽事例1～3の他、愛媛県で架設されたトラス橋（下路式、ボンゴシ材、供用年数10年）や、秋田県で供用中の坊川2号橋（現在も良好な状態ではあるが耐用年数を30年と仮定した）、静岡県で供用中のアーチ橋（下路式、ボンゴシ材、供用10年で軽微な補修を実施）を対象とした。これらの腐朽事例と以下の(5)～(10)に示す検討に基づき、各要因の配点調整を行い、本節に示す耐用年数が概ね妥当であることを確認した。

(5) 使用材料[P]について ($P=p_1+p_2 \times p_3$)

表-1.4.2は、主材に用いる材料固有の耐朽性 (p_1) を反映するものである。配点は、木造建築物の耐用年数に関する文献^{1.4.2)}や、腐朽試験資料^{1.4.3)}を参考に設定した。

表-1.4.3は、材料別の防腐剤の浸透性 (P_2) を反映するものである。配点は、防腐処理技術に関する資料^{1.4.3)}を参考に設定した。

表-1.4.4は、防腐処理方法 (P_3) を反映するものである。加圧注入処理と表面塗布処理の両方を施す場合には合計点を用いる。配点は、木造建築物の耐用年数に関する文献^{1.4.2)}によれば、防腐剤の加圧注入処理は0.70点、表面塗布処理は0.30点とされているが、木橋が屋外構造物であることを踏まえ、加圧注入処理を0.60点、表面塗布処理を0.20点に設定した。なお、防腐剤別の区別はここでは行っていないことから、状況に応じて選定して頂きたい。

(6) 周辺環境[E]について ($E=e_1 \times e_2 \times e_3$)

表-1.4.5と図-1.4.2は、蟻害の影響 (e_1) を反映するものである。配点は、ヤマトシロアリおよびイエシロアリの生息分布資料^{1.4.4)}を参考に設定した。

表-1.4.6と図-1.4.3は、腐朽菌の影響 (e_2) を反映するものである。日平均気温15℃以上の年間日数を基準として、木造建築物の耐用年数に関する文献^{1.4.2)}を参考に設定した。

表-1.4.7と図-1.4.4は、湿度の影響 (e_3) を反映するものである。水分は温度とともに腐朽菌の生育条件である。日本において、日平均気温15℃以上となる期間は概ね4月から10月であることから、主要都市の当該月における月別湿度調査資料^{1.4.5)}を参考に設定した。

ここで、蟻害と腐朽菌、湿度の地域区分については、都道府県単位で表現したものである。架橋地点付近の局所的な情報が入手できれば、それにより配点を調整することもできる。

(7) 構造形式[S]について ($S=s_1 \times s_2 \times s_3$)

表-1.4.8は、主材が雨露に直接曝されるか否か、上路橋または下路橋の区分 (s_1) を行うことで、床版部の屋根の機能を反映するものである。上路橋は床版が屋根の代わりとなり、主材を雨に直接曝されることを防ぐと考えられるが、下路橋は雨に直接曝されることから、下路橋を下位の点数とした。

表-1.4.9は、上部工の構造形式 (s_2) を腐朽の一因と捉えたものである。桁橋は他の形式に比べ接合箇所も少なく、かつ、通気性が確保されると考え、最上位の点数とした。アーチ橋についても桁橋と同様と思われるが、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と考え、次点とした。床版橋は、主版を構成する部材と部材が密接し、水が侵入した場合に乾燥が妨げられると考えられることから、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、一部材の腐朽が全体構造に与える影響が大きいため、最も低い点数とした。

表-1.4.10は、床版の形式 (s_3) を腐朽の一因と捉えたものである。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き板を並べたような形式は、屋根の効果が低いと考え、さらに低い点数とした。

なお、下路橋の場合は床版が無効であることから、 s_3 の値は1.00として計上する。

(8) 設計計画[D]について ($D=0.60 + \Sigma d$)

表-1.4.11は、腐朽に対する構造的対応 (d) を反映するものである。主材や床版の防水処理や橋座の排水勾配等、配慮した項目の合計を加点する。なお、上路橋の場合の床版張出部は、主材を雨露から防ぐと捉え、0.40を加点する。ここで、対策を行わない場合は、 $\Sigma d=0.00$ となるが、Dの値は腐朽事例から得られた低減値0.60に加算することで得られることから、Dの最低値はD=0.60となることに留意する。

(9) 施工管理[C]について ($C=\sum c$)

表-1.4.12は、腐朽に対する施工時の対応(c)を反映するものである。部材を裸で運搬・仮置した場合、雨露等が侵入し、構造的な対応が意味をなさない場合もある。特に、接合用孔等に水分を多く含むことは腐朽の一因となる。したがって、部材をシート保護する等の対応が必要と思われる。また、現場加工部の防腐処理等も重要である。これらは施工時の記録や工事写真等がない場合は確認が難しい内容ではあるが、配慮した項目の合計を計上する。なお、特に施工に支障がなく架設が完了した場合は、「標準管理による施工」として、 $C=1.00$ を計上する。

(10) 維持管理[M]について ($M=N \times m$)

表-1.4.13は、維持管理手法(m)を反映するものである。ここで、予防保全とは、日常点検および定期的な詳細点検を行うとともに、腐朽の疑いがある部材や腐朽しやすい部材に対し、予防的な保全行為を行うことであり、定期的な防腐剤の再塗布や部材の取替え等を意味する。事後保全とは、日常点検および定期的な詳細点検により、腐朽が確認された場合に保全行為を行うことであり、腐朽の程度に応じてその対策は異なる。簡易保全とは、清掃や簡易な補修を含む日常点検を行う場合である。無点検保全とは保全行為を行わないことである。

これらの保全行為は行われない場合もあり、指標値Yへの加点には注意を要する。したがって、当初の設計計画において耐用年数を推定する場合は、これを考慮しないものとするが、保全計画等に用いられる場合もあることから、mに保全行為の実施・予定回数Nを乗じることで点数を算出する。なお、各保全形態を問わず、例えば目視のみの点検等、保全行為を伴わない点検については点数を計上しない。

1.5 耐用年数予測算定例

(1) 東海地方に計画する桁橋の場合（推定例 1）

以下の条件を想定し、耐用年数を推定する。

- ・静岡県沿岸部の公園内に木歩道橋を計画する。
- ・材料はスギ集成材を使用する。
- ・集成材の防腐は、加圧注入処理と保護塗料を併用する。
- ・床版は木床版とする。ただし、製材を敷き並べて造る。
- ・橋座には排水勾配を付ける。
- ・部材の仮置き時はシート保護を義務付け、後加工部は現場にて防腐処理を実施する。

表-1.5.1 推定例 1 の耐用年数

要因	推定条件	細別した要因	計算式	評価点	
使用材料	スギ	p ₁	1.00	$P = p_1 + p_2 \times p_3$	1.80
	〃	p ₂	1.00		
	加圧注入+保護塗装	p ₃	0.80		
周辺環境	静岡県	e ₁	0.90	$E = e_1 \times e_2 \times e_3$	0.81
	〃	e ₂	1.00		
	〃	e ₃	0.90		
構造形式	上路橋	s ₁	1.00	$S = s_1 \times s_2 \times s_3$	0.95
	桁橋	s ₂	1.00		
	木床版（敷き板）	s ₃	0.95		
設計計画	橋座の排水	d	0.10	$D = 0.60 + \sum d$	0.70
施工管理	全項目を実施	c	1.20	$C = \sum c$	1.20
維持管理	—	m	—	$M = N \times m$	—
指標値	Y	$Y = P \times E \times S \times D \times C$			1.16
耐用年数	T				17年（15～20年）

表-1.5.1より、耐用年数は17年（15～20年）と推定される。したがって、これを参考に設計供用期間を設定し、各種の安全係数を用いて部材の設計・照査を行う。

また、仮に架橋後の予防保全を義務付け、2回の保全行為が行われた場合は、表-1.5.2に示すように、耐用年数は23年（20～25年）と推定される。ただし、保全行為は腐朽状況により行われない場合もあることから、この場合の耐用年数は事業計画や補修計画に利用されるものとする。

表-1.5.2 推定例 1 の耐用年数（予防保全が義務付けられる場合）

要因	推定条件	細別した要因	計算式	評価点	
使用材料	スギ	p ₁	1.00	$P = p_1 + p_2 \times p_3$	1.80
	〃	p ₂	1.00		
	加圧注入+保護塗装	p ₃	0.80		
周辺環境	静岡県	e ₁	0.90	$E = e_1 \times e_2 \times e_3$	0.81
	〃	e ₂	1.00		
	〃	e ₃	0.90		
構造形式	上路橋	s ₁	1.00	$S = s_1 \times s_2 \times s_3$	0.95
	桁橋	s ₂	1.00		
	木床版（敷き板）	s ₃	0.95		
設計計画	橋座の排水	d	0.10	$D = 0.60 + \sum d$	0.70
施工管理	全項目を実施	c	1.20	$C = \sum c$	1.20
維持管理	2回の保全行為	m	0.30	$M = N \times m$	0.60
指標値	Y	$Y = P \times E \times S \times D \times C + M$			1.76
耐用年数	T				23年（20～25年）

(2) 中央高地に計画する床版橋の場合（推定例 2）

以下の条件を想定し、耐用年数を推定する。なお、推定結果を表-1.5.3に示す。

- ・長野県の林道に木車道橋を計画する。
- ・材料はカラマツ集成材を使用する。
- ・集成材の防腐は、加圧注入処理と保護塗料を併用する。
- ・木主版上にコンクリート床版を設置する。
- ・防水シートや橋座の排水勾配等、全ての雨水対策を計画する。
- ・部材の仮置き時はシート保護を義務付け、後加工部は現場にて防腐処理を実施する。

表-1.5.3 推定例 2 の耐用年数

要 因	推定条件	細別した要因	計算式	評価点	
使用材料	P	カラマツ	p_1 1.00	$P = p_1 + p_2 \times p_3$	1.72
		〃	p_2 0.90		
		加圧注入+保護塗装	p_3 0.80		
周辺環境	E	長野県	e_1 1.00	$E = e_1 \times e_2 \times e_3$	1.10
		〃	e_2 1.10		
		〃	e_3 1.00		
構造形式	S	上路橋	s_1 1.00	$S = s_1 \times s_2 \times s_3$	1.05
		床版橋	s_2 0.95		
		コンクリート床版	s_3 1.10		
設計計画	D	全項目を計画	d 0.70	$D = 0.60 + \Sigma d$	1.30
施工管理	C	全項目を実施	c 1.20	$C = \Sigma c$	1.20
指標値	Y	$Y = P \times E \times S \times D \times C$			3.08
耐用年数	T				36年 (35~40年)

(3) 東北地方に計画する下路アーチ橋の場合（推定例 3）

以下の条件を想定し、耐用年数を推定する。なお、推定結果を表-1.5.4に示す。

- ・林道に木車道橋を計画する。
- ・材料はスギ集成材を使用する。
- ・集成材の防腐は、加圧注入処理を行う。
- ・鋼床版を設置するが、下路式であることから主材の雨水からの保護効果はない。
- ・主材には桁覆を付け、防水処理等を行う。橋座の排水勾配等、全ての雨水対策を行う。
- ・部材の仮置き時はシート保護を義務付け、後加工部は現場にて防腐処理を実施する。

表-1.5.4 推定例 3 の耐用年数

要 因	推定条件	細別した要因	計算式	評価点	
使用材料	P	スギ	p_1 1.00	$P = p_1 + p_2 \times p_3$	1.60
		〃	p_2 1.00		
		加圧注入	p_3 0.60		
周辺環境	E	秋田県	e_1 1.00	$E = e_1 \times e_2 \times e_3$	1.05
		〃	e_2 1.10		
		〃	e_3 0.95		
構造形式	S	下路橋	s_1 0.90	$S = s_1 \times s_2 \times s_3$	0.87
		アーチ橋	s_2 0.97		
		—	s_3 1.00		
設計計画	D	全項目を計画	d 0.70	$D = 0.60 + \Sigma d$	1.30
施工管理	C	全項目を実施	c 1.20	$C = \Sigma c$	1.20
指標値	Y	$Y = P \times E \times S \times D \times C$			2.28
耐用年数	T				28年 (25~30年)

1.6 腐朽事例による検証

前節までに示した耐用年数の推定方法の妥当性を確認するためには、実際の腐朽事例に基づき指標値Yを算出し、実値との比較を行うことが必要である。本節では、収集した腐朽事例から抜粋し、それぞれの推定結果を示す。

(1) 北陸地方沿岸部の歩道橋（腐朽事例 1）

写真-1.6.1と写真-1.6.2は、昭和55年（1980年）に北陸地方沿岸部に架橋された歩道橋である。主桁にスギ丸太を使用し、当初は防腐塗装が行われていた。床版はデッキプレートを用いており、排水桝により橋面排水が行われている。本橋は、生活道路として供用されていたが、橋台部の主桁が土に覆われている等、水処理の不具合を一因に桁端部が腐朽し、架橋後22年（2002年）を経て架替に至った。表-1.6.1に、腐朽事例1の耐用年数の推定結果を示す。



写真-1.6.1 橋面状況



写真-1.6.2 桁下および橋台状況

表-1.6.1 腐朽事例 1 の耐用年数

要因	推定条件	細別した要因	計算式	評価点	
使用材料	スギ	p_1	1.00	$P = p_1 + p_2 \times p_3$	1.20
	〃	p_2	1.00		
	保護塗装	p_3	0.20		
周辺環境	北陸地方沿岸部	e_1	1.00	$E = e_1 \times e_2 \times e_3$	1.00
	〃	e_2	1.00		
	〃	e_3	1.00		
構造形式	上路橋	s_1	1.00	$S = s_1 \times s_2 \times s_3$	1.10
	桁橋	s_2	1.00		
	コンクリート床版	s_3	1.10		
設計計画	主材保護と排水装置	d	0.50	$D = 0.60 + \Sigma d$	1.10
施工管理	標準施工	c	1.00	$C = \Sigma c$	1.00
維持管理	—	m	—	$M = N \times m$	—
指標値	$Y = P \times E \times S \times D \times C$			1.45	
耐用年数	T			19年（15～20年）	

表-1.6.1より、設計計画[D]については、床版の張出しによる主材の防水と排水装置を考慮して点数を計上した。また、施工管理[C]および維持管理[M]については、管理記録等が確認されないことから、点数を計上していない。指標値Yから得られる耐用年数は19年（15～20年）であり、実値（22年）と概ね整合していると思われる。

(2) 東海地方山間部の歩道施設（腐朽事例 2）

写真-1.6.3と写真-1.6.4は、平成7年（1995年）に東海地方山間部で建設された歩道施設である。主要材料にスギ製材を使用し、防腐処理は行われていなかった。床版は製材を敷き並べる形式であり、特に排水施設等は設けられていない。また、柱部分は土中に埋め込まれている。本施設は、公園内の遊歩道として供用されていたが、各部の腐朽が著しく幾度かの取替えが行われたが、建設後10年（2005年）を経て取壊しに至った。表-1.6.2に、腐朽事例 2 の耐用年数の推定結果を示す。



写真-1.6.3 路面状況



写真-1.6.4 骨組および施設状況

表-1.6.2 腐朽事例 2 の耐用年数

要因	推定条件	細別した要因	計算式	評価点	
使用材料	スギ	p ₁	1.00	$P = p_1 + p_2 \times p_3$	1.00
	〃	p ₂	1.00		
	防腐処理なし	p ₃	0.00		
周辺環境	東海地方山間部	e ₁	0.90	$E = e_1 \times e_2 \times e_3$	0.81
	〃	e ₂	1.00		
	〃	e ₃	0.90		
構造形式	上路形式	s ₁	1.00	$S = s_1 \times s_2 \times s_3$	0.76
	トラス構造	s ₂	0.80		
	木床版（敷き板）	s ₃	0.95		
設計計画	対策なし	d	0.00	$D = 0.60 + \Sigma d$	0.60
施工管理	標準施工	c	1.00	$C = \Sigma c$	1.00
維持管理	—	m	—	$M = N \times m$	—
指標値	$Y = P \times E \times S \times D \times C$				0.37
耐用年数					9年（5～10年）

表-1.6.2より、構造形式[S]については、橋梁ではないものの、比較的近い構造形式として、上路形式のトラス橋の点数を計上した。また、施工管理[C]および維持管理[M]については、管理記録等が確認されないことから、点数を計上していない。指標値Yから得られる耐用年数は9年であり、実値（10年）と概ね整合していると思われる。

(3) 中国地方山間部の歩道橋（腐朽事例 3）

写真-1.6.5と写真-1.6.6は、平成2年（1990年）に中国地方山間部の公園内で建設された歩道橋である。主要材料にベイマツ集成材を使用し、防腐処理は加圧注入処理と防腐塗装が行われた。床版は製材を敷き並べる形式である。本橋は、弦材接合部等の腐朽により、建設後13年（2003年）を経て撤去に至った。表-1.6.3に、腐朽事例 3の耐用年数の推定結果を示す。なお、写真は撤去後に行われた載荷試験時の状況写真である。



写真-1.6.5 全体状況

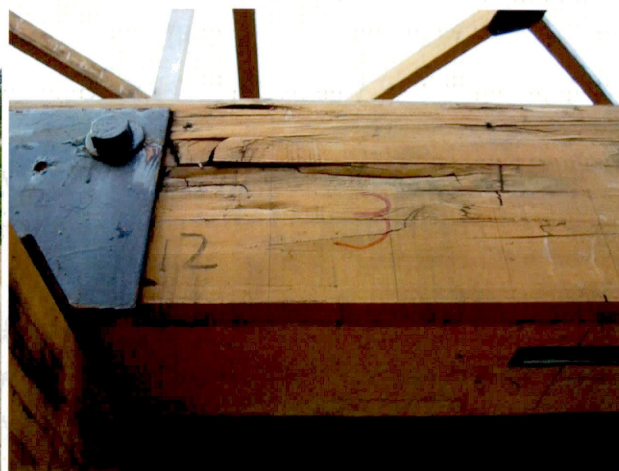


写真-1.6.6 腐朽状況

表-1.6.3 腐朽事例 3 の耐用年数

要因	推定条件	細別した要因	計算式	評価点
使用材料	ベイマツ	p_1	$P = p_1 + p_2 \times p_3$	1.80
	〃	p_2		
	加圧注入+保護塗装	p_3		
周辺環境	広島県	e_1	$E = e_1 \times e_2 \times e_3$	0.81
	〃	e_2		
	〃	e_3		
構造形式	下路橋	s_1	$S = s_1 \times s_2 \times s_3$	0.72
	トラス橋	s_2		
	—	s_3		
設計計画	対策なし	d	$D = 0.60 + \Sigma d$	0.60
施工管理	標準施工	c	$C = \Sigma c$	1.00
維持管理	—	m	$M = N \times m$	—
指標値	$Y = P \times E \times S \times D \times C$			0.63
耐用年数	T			11年（10～15年）

表-1.6.3より、設計計画[D]については、下路橋であることから、床版による主材の防水は考慮していない。また、施工管理[C]および維持管理[M]については、管理記録等が確認されないことから、点数を計上していない。指標値Yから得られる耐用年数は11年（10～15年）であり、実値（13年）と概ね整合していると思われる。

1.7 おわりに

橋梁等の構造物が担う最も重要な役割は、その供用年間において、各種の外力や自己機能に対する安全性が確保され続けることであり、設計論・製作技術・施工方法・維持管理手法の変遷は、ひとつに安全確保の歴史と言っても過言ではない。

設計論を特筆すれば、より安全に対する信頼を高めるべく、近年、わが国を含め各国の示方書や設計規準等で、これまで用いられてきた許容応力度設計法から限界状態設計法へと移行されつつあり、木橋の設計についても、「木橋技術の手引き2005」において、限界状態設計が可能となった。

本章は、木橋の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、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、耐用年数の推定方法について取りまとめたものである。

現在収集済みの腐朽事例によれば、本章で紹介している耐用年数の推定方法は概ね妥当と判断できる。ただし、数例の腐朽事例による検証では、推定式の構成や、使用材料・周辺環境等の各要因の相関性・重み付け等の妥当性を判断することは難しい。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が得られていない。したがって、現段階では得られる耐用年数は確定的なものではなく、あくまで参考値または期待値として取り扱うものと思われるが、多くの事例に基づく検証や腐朽や蟻害、経年的な耐力変化等に関する継続的な研究の展開により、推定精度の向上が期待できると思われる。

参考文献

1. 2. 1) (社)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2005，2005.
1. 2. 2) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－，2002.
1. 3. 1) 国土開発技術研究センター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，建築物の耐久性向上技術シリーズ 建築構造編Ⅲ，技報堂出版，1986.
1. 3. 2) 三上市藏・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.
1. 3. 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シンポジウム論文報告集，pp. 135-140，2008.
1. 4. 1) わかりやすい橋梁設計計算例及び解説：日本工芸出版
1. 4. 2) 国土開発技術研究センター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，建築物の耐久性向上技術シリーズ 建築構造編Ⅲ，技報堂出版，1986.
1. 4. 3) 愛媛県農林水産部：木材利用推進マニュアル，<http://www.pref.ehime.jp/>
1. 4. 4) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説，2002.
1. 4. 5) 株式会社笠原：主要都市の月別気温と湿度，<http://www.mokk.co.jp/>