

木橋における修復限界状態設計の考え方

A study on the restorability limit state of timber bridges

○中村 昇*、平沢秀之**、佐々木貴信***

NAKAMURA Noboru, HIRASAWA Hideyuki and SASAKI Takanobu

*農博 新潟大学農学部 (〒950-2181 新潟市五十嵐二の町8050)

**博 (工) 函館工業高等専門学校 (〒042-8501 函館市戸倉町14-1)

***博 (工) 秋田県立大学木材高度加工研究所 (〒016-0867 能代市海詠坂11-1)

ABSTRACT In Technical Guideline on Timber Bridges, limit states design is adopted for structural design. The design format for ultimate limit state and serviceability limit state are proposed, but restorability limit state is not involved. Restorability limit state design is very suitable for timber bridges. Because the maintenance is indispensable to timber bridges. And if the restoration would be done after the period determined in the beginning, over design can be avoid and the cost might be smaller. In Basis of Structural Design for Buildings and Public Works published in 2002 by Ministry of Land, Infrastructure and Transport, restorability limit state is involved. From this point of view a study on the restorability limit state of timber bridges is suggested here. Load and resistance factor considered restorability limit state can be calculated if the restorability limit state can be specified and the change of strength decrease by decay and so on and.

Keywords : 修復限界状態、信頼性指標、荷重継続時間の影響、腐朽
restorability limit state, reliability index, duration of load effect, decay

1. はじめに

国土交通省で策定された「土木・建築にかかる設計の基本」¹⁾は、設計に係わる国際技術標準への対応といった面のみならず、国内の各技術標準間及び国際技術標準との整合性の確保といった面も含め、分野・構造種別を超えた「日本の考え」が示されている。内容の概要は次の通りである。

- (1) 構造物の基本的要求性能として、「安全性」、「使用性」及び「修復性」の確保を規定している。
- (2) 構造物の設計供用期間を定める。
- (3) 要求性能を満たすことの検証方法としては信頼性設計の考え方を基礎として限界状態設計を考える。
- (4) 耐震設計では設定した耐震性能を明示し、それに対する地震動レベルを設定する。

これは、昨年発行された「木橋技術の手引き2005」²⁾における、性能照査設計（限界状態設計）法の体系であることがお分かりいただけると思う。しかし、同手引きには、上述した修復限界状態は規定していない。昨今、環境問題やコスト削減などにより、土木・建築構造物を修復して使用を継続していこうという気運が高まっている。そこで、木橋における修復限界状態設計の考え方を提示することを目的とした。

2. 「土木・建築にかかる設計の基本」における修復限界状態

修復限界状態とは、想定される作用により生ずることが予測される損傷に対して、適用可能な技術でかつ妥当な系譜および期間の範囲で修復を行えば、構造物の継続使用を可能とすることができる限界の状態とされている。そのイメージを図.1 に示した。また、次のようにも既述されている。

現在のところ、土木・建築両分野にわたって、修復限界状態として明示的な扱いの必要性が認められているのは、地震作用に対するものに限定されている。例えば、環境作用に伴う（耐久性）

に関して、現在は、構造細目により仕様規定として扱われており、明示的な扱いとはなっていないため、ここでは、修復限界状態の特定限界状態として耐久性限界状態を規定しなかった。しかし、今後、分野によっては、現行の細目規定の目的として、疲労、耐久性、耐火性に係わる修復限界状態が明示される方向に進む可能性もある。そうした場合には、「特定作用限界状態」の枠組みを修復限界状態に含めて考えることが妥当である。

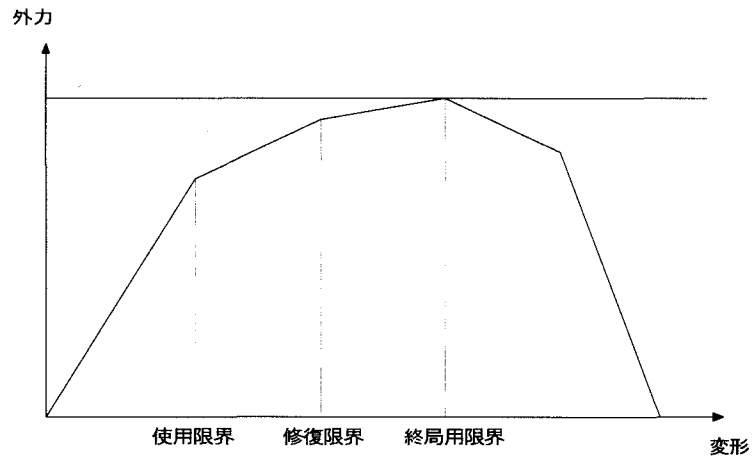


図.1 各限界状態のイメージ

(注) 国土交通省「土木・建築にかかる設計の基本」から引用

3. 限界状態設計のフォーマット

「木橋技術の手引き 2005」における設計式のフォーマットは、設計計算に供するよう配慮した簡便な設計手法である荷重・耐力係数を用いている。この荷重・耐力係数を用いる設計は、設計案の置かれる不確定状況と目標信頼性を考慮して設定された、各種の荷重・耐力係数を用いて設計荷重効果・設計耐力に対応する確定的状況を想定し、そこで設計案が設計目標を満足しているかどうかを照査するという流れで行われる。言い換えれば、目標信頼性指標 β_T に応じて荷重係数 γ_i および耐力係数 ϕ を算定しておき、一般的には、次式で表される設計式により照査することになる。

$$\sum \gamma_i \cdot W_{ni} \leq \phi \cdot R_n$$

ここで、 ϕ は耐力係数、 R_n は耐力の公称値、 γ_i は荷重係数、 W_{ni} は荷重の基本値である。しかし、木材は荷重継続時間の影響や置かれる環境などにより、経年的に耐力が低下していくことが分かっているため、耐力の調整係数 A_f を考慮した次式の設計式を用いる。

$$\sum \gamma_i \cdot W_{ni} \leq \phi \cdot A_f \cdot R_n \quad (1)$$

例えば、現行の建築基準法に用いられている荷重継続時間 (DOL) の影響係数は、図.2に示される強度比と荷重継続時間の関係をもとにしているので、

DOLの影響に係わる A_f は同図の強度比となる。ここで、強度比とは、実験室における強度試験を荷重継続時間10分とし、その強度に対する、ある荷重継続時間における強度の比³⁾のことを言う。

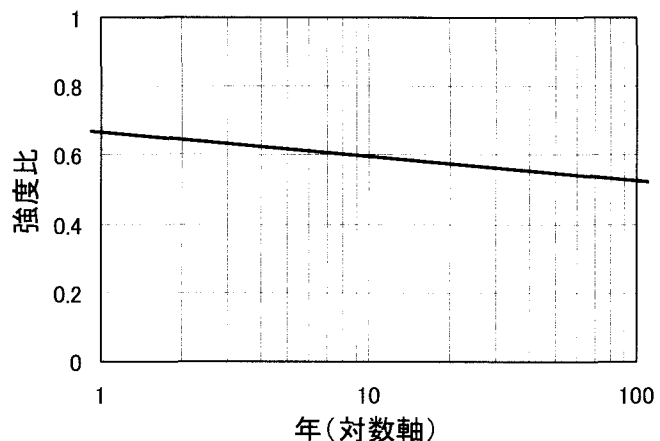


図.2 強度比と荷重継続時間の関係

4. 信頼性指標 β の経年変化

DOL影響係数を用いれば、供用期間を50年とすれば、 $A_f=1.1/2$ と算定³⁾されるが、設計された木橋は供用期間50年にわたり、当初設定した β_T を満足しなければならない。したがって、現実的には、50年後の耐力を用いて設計式(1)により部材の断面や接合部の仕様を決めることになり、初期の信頼性指標の値は、目標信頼性指標 β_T よりも大きくなっている。例えば、荷重組合せD+Tにおいて、供用期間50年、 $\beta_T=3.0$ (破壊確率は約0.001) とした場合、各年の信頼性指標 β は、次のよ

うに算出される。

「木橋技術の手引き 2005」では、設計供用期間を t 年とすれば、軸荷重の t 年最大値分布 $F_t(x)$ は次式で表される。

$$F_t(x) = [F(x)]^{t/365} = \exp\left[-\exp\left[-0.04\left(x - 0 - \frac{\ln(n \cdot t \cdot 365)}{0.04}\right)\right]\right] \quad (x \leq 300\text{kN})$$

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。

$$F_D(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (\mu: \text{平均}, \sigma: \text{標準偏差})$$

一方、主桁等構造部材の耐力分布は、2Pワイブル分布としているので、その分布 $F_R(x)$ は次式で表される。ここで注意しなければいけないのは、耐力 x の代わりに、荷重継続時間の影響を考慮し、 x/A_f となっていることである。

$$F_R(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{(x/A_f)^m}{\alpha}\right)\right] \quad (m, \alpha: \text{パラメータ})$$

これより、AFOSM法を用いて、図.3 のように信頼性指標 β の推移が得られる。例えば、1年目の破壊確率は約 0.00002 であり、50年後のおよそ 1/50 であるように、 β は年ごとに減少していくことが分かる。

その他の調整係数には、寸法効果係数、含水率影響係数、処理影響係数、クリープ変形係数、システム係数が示されている³⁾が、経年的なものに関係するのは、含水率影響係数であろう。しかし、これは、木材における含水率と強度の関係を勘案して算定されており、DOL係数のように経年的に変化するものではない。また、腐朽についてもDOL係数と同様に考えることができるが、周り環境や設計・施工にも関係し、図.2のように表すことができないであろう。

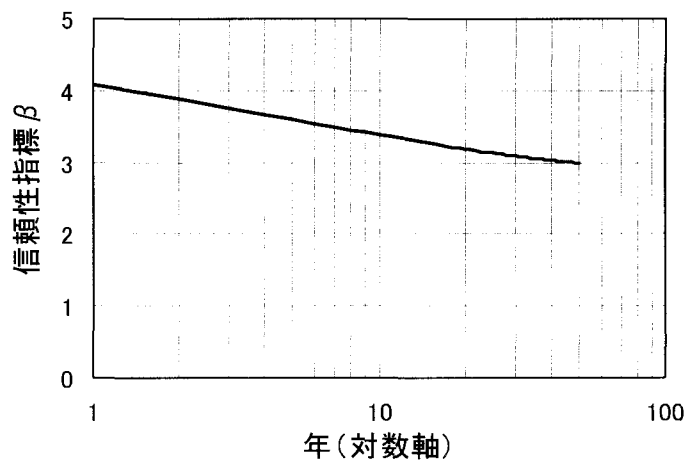


図.3 時間と信頼性指標 β との関係

5. 修復限界状態設計の考え方

5.1 予め修復を設定した限界状態

前節で述べたように、DOLの影響など、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。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.4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。

この場合、修復限界状態設計では、例えば、供用期間を50年とするならば、荷重はすべて50年最大値分布を考慮して設計しなければならない。しかし、20年後に修復するのであれば、20年最大値分布を考慮すればよいことになり、部材断面や接合部の設計に影響を及ぼす。しかし、主桁など、修復しない要素は、図.4に示したように供用期間最大値分布を考慮しなければならないの

は言うまでもない。例えば、上述した、荷重組合せD+Tの場合、耐力係数言えば、供用期間50年では、 $\phi=0.631$ であるが、供用期間20年では、 $\phi=0.634$ となり、わずかではあるが、耐力を増して断面を算定できる。D+Tの場合、供用期間20年と50年では、車重の最大値分布がほぼ同じであるため、耐力係数にあまり影響を及ぼさないからである。

また、車重の場合、繰り返し荷重による耐力に及ぼす経年変化を考慮して、設計がなされるであろう。例えば、交通量が減少した場合など、修復時に、修復限界状態設計を適用することにより、以後の過剰な設計を避けることができる可能性もある。

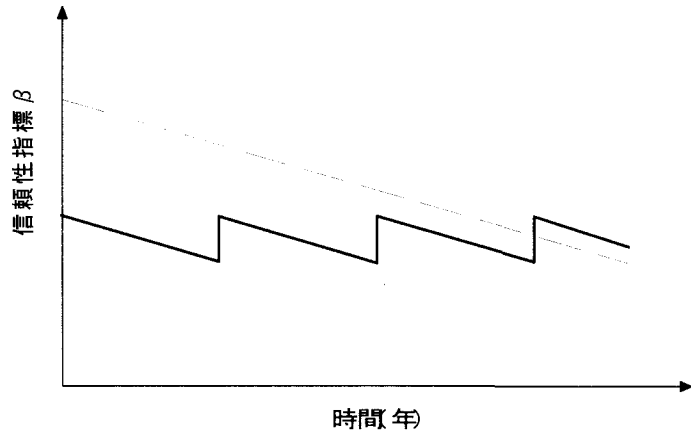


図.4 修復限界状態設計による β の変化
(注) 点線：修復しない場合の β
実線：修復する場合の β

5.2 予め修復を設定しない限界状態

5.1のように、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い場合もある。このような状況を模式的に表したのが、図.5である。この場合、修復することにより、木橋を構成する要素の耐力がどのレベルまで増加したかを特定することが難しいと思われる。

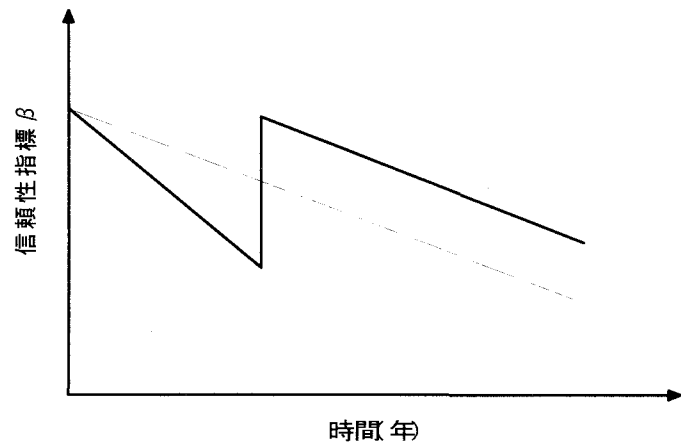


図.5 修復限界状態設計による β の変化
(注) 点線：修復しない場合の β
実線：修復する場合の β

6. 修復限界状態設計のフォーマット

設計式のフォーマットは、上述した(1)式と同じであるが、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。

7. 問題点

図.1には「土木・建築にかかる設計の基本」における修復限界のイメージが示されているが、木橋の場合、修復限界状態をどこにするのか、特に腐朽による耐力の減少の場合、減少割合を算定できないと、修復限界状態を規定することはできないであろう。

文献

- 1) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本、2002。
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/13/131021_.html
- 2) (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。
- 3) 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。