

# 道路橋示方書における部分係数設計法と限界状態設計法

白戸真大

## 1. はじめに

改定された道路橋示方書では、橋の耐荷性能の照査のために、部分係数設計法や限界状態設計法が導入された。前項にまとめた新たな性能規定化の検討が行われる中で、これらの意味合い、位置づけから検討された結果、性能規定化を実現するツールとしての部分係数や限界状態の定義や設定法が構築された。それだけに、改定された道路橋示方書の解釈と運用にあたっては、性能規定化の構造とこれらの設計法の関係性の理解が重要になる。そこで、本稿では、道路橋示方書における性能規定化構造とこれらの設計法の間を解説する。

## 2. 橋の耐荷性能に関する性能マトリクス

改定された道路橋示方書では、橋の耐荷性能は、橋が置かれる「状況」に対して、橋が必要な「状態」に留まることが、所要の確からしきで満足されることと定義されている。これらの関係は、表-1に示すいわゆる性能マトリクスで表現できる。

橋がおかれる「状況」とは、概念としては架橋位置が決まれば決まるものであり、時々刻々で変化する無数の荷重の無数の組み合わせの連続である。橋の「状態」とは、その状況下における橋の応答であり、組合せ荷重に橋が抵抗した結果である。このように耐荷性能を定義することで、時々刻々変化する状況は荷重の組み合わせで、状態（応答）は抵抗と関連づけられる。そして、設計で考慮する状況の設定に求める水準や不確実性の程度、求める状態に留まることが確からしさの水準や不確実性の程度について工学的（又は確率的）に意味ある説明が可能になる。

改定された道路橋示方書では、荷重の同時載荷状況は、同時載荷されるなかでも主となる荷重の種類に応じて、永続作用が支配的な状況、変動作用が支配的な状況、偶発作用が支配的な状況の3つに区分された。永続作用とは、設計供用期間内にその大

きさが大きく変動することがない作用で部材等に影響を及ぼす作用、変動作用とは、設計供用期間内に絶えず大きさが変動し、最大値又は最小値が部材等に及ぼす影響が無視できない作用、偶発作用とは、設計供用期間に対して規模や頻度を確率的に扱うことが困難であるが、一旦生じると部材等に及ぼす影響が甚大となり得る作用をいう。そして、それぞれの区分において設計で考慮する状況は荷重組合せで与えるものとされ、設計状況と称された。確率的な扱いも可能である永続作用や変動作用が支配的な状況については、信頼性の水準に工学的な意味を有するように荷重の組合せを設定することができるようになった。

橋が荷重に抵抗する過程を表すため、橋に想定する状態も区分する。そして、それぞれの状態の区分となる代表的な状態が限界状態であり、限界状態1から3として定義される。表-1で言えば、縦の区切り線が区分された状態の境界であり、限界状態に対応する。したがって、ある状態の区分に橋が留まっていることの確実性は、材料や寸法、抵抗メカニズムのモデル誤差等を考慮して限界状態の再現性を制御し、これを越えないようにすることで考慮できる。すなわち、信頼性の水準に工学的な意味を有するように限界状態を代表させた制限値を算出する。

最終的に、信頼性の水準に工学的な意味を有するように設定された設計状況下において、橋の状態（応答値）を算出する。そして、算出した応答値と制限値を比べることで、設計状況下における橋の状態がその状況下での限界状態を超えないことが照査され、これを以て、その状況下で橋は想定する状態に留まることが所要の信頼性で担保されるとみなされる。これが、表-1の各マトリクスにおける「所要の信頼性」の意味になる。

表-1のマトリクスからわかるように、一つの設計状況について評価される橋の状態（応答）は、機能面から定まる限界状態（限界状態1又は2）を超えないことについて所要の信頼性を確保できていること、構造安全性の面から定まる限界状態（限界状態3）を超えないことについて必要な信頼性が得られ

表-1 性能マトリクスの例

状態 状況	機能面から定まる状態		構造安全性から定まる状態
	橋としての荷重を支持する能力が損なわれていない状態	部分的に荷重を支持する能力が損なわれているが、想定する範囲内にある状態	致命的でない状態
永続作用や変動作用が支配的な状況	所要の信頼性で状態を実現できる		所要の信頼性で状態を実現できる
偶発作用が支配的な状況		所要の信頼性で状態を実現できる	所要の信頼性で状態を実現できる

限界状態1

限界状態2

限界状態3

ていることの両者を満足する必要がある。これは、換言すれば、次のように見ることもできる。設計供用期間中に生じ得る組合せ荷重の最大値を安全側に評価できるように荷重組合せが設定されていたり、機能面から定める限界状態の制限値がその評価の不確実性が十分小さくなるように設定されているとしても、それぞれの見込み違いが生じないことの確率はゼロにはならない。そこで、同じ設計状況（荷重組合せ）において、構造安全性から定める限界状態を超えないことの信頼性も直接的に確保するようにしている。

このような橋の耐荷性能の規定の方法において設計状況に確率的な意味を与えるためには、ある期間を仮定し、組み合わせ荷重の統計的な信頼性を評価することになる。これが、改定された道路橋示方書にて、前稿で説明した設計供用期間が定義されていることの理由の一つである。

改定された道路橋示方書では、橋の耐久性能の照査においては限界状態という概念や用語はない。設計供用期間中のいつ何時でも荷重に対して橋が設計で想定した抵抗をするためには、その前提として、抵抗特性として見込む断面や材料の力学特性に齟齬が生じるような経時変化が生じていないことが求められる。そこで、経時的な影響の累積に対して耐荷性能の前提とする橋の抵抗特性が維持される時間的な信頼性が保証されていることが必要になり、前稿で述べたとおり、新たに、橋の耐久性能が橋の耐荷性能の前提条件として規定された。この定義によれば、腐食、塩害、疲労による強度低下を考慮した部材計算を行う必要はない。

また、表-1において、限界状態1は、物理的には

部材挙動の可逆性に着目した限界状態であり、学協会等で定義されているいわゆる「使用性の限界状態」とは異なり、使用に際しての快適性などの変状が生じない限界等の概念が含まれない。使用に際しての快適性などは、改定された道路橋示方書では、橋の使用目的との適合性を満足するために必要なその他性能として考慮されるものである。

### 3. 性能の階層化と荷重と抵抗の部分係数

道路橋示方書では、橋の耐荷性能を照査するにあたって、橋の限界状態を部材や接合の限界状態によって代表させることもできるとされた。そこで、一般には、従来と同様に、部材等の単位で照査が行われる。部材等の耐荷性能の照査式として、今回の技術基準の改定では、部分係数を用いた次式が基本式にされた。

$$\sum S_i (\gamma_{pi} \gamma_{qi} P_i) \leq \xi_1 \xi_2 \Phi R \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $\gamma_{pi}$ 、 $\gamma_{qi}$ 、 $\Phi$ 、 $\xi_1$ 、 $\xi_2$ が部分係数と呼ばれるものである。部分係数の定義は、表-2にまとめた。 $P_i$ が荷重 $i$ 、 $\gamma_{pi}$ と $\gamma_{qi}$ が表-2に示すとおり荷重 $i$ に対する荷重組合せ係数と荷重係数である。 $S$ が荷重効果であり、たとえば断面力、応力、変位など、組合せ荷重に対して橋が応答した状態を表す状態量である。 $R$ は抵抗値であり、限界状態を表す状態量の特値である。そして、 $\Phi$ が抵抗係数、 $\xi_1$ が調査・解析係数、 $\xi_2$ が部材・構造係数であり、最終的に $\xi_1 \xi_2 \Phi R$ が制限値になる。前述の橋の耐荷性能の照査と同様に、たとえば、変動作用が支配的な状況において、同一の荷重組合せ（設計状況）に対して、部材等の限界状態1と限界状態3の両者について、それぞれ対応する $R$ と対応する $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 、 $\Phi$ を考慮した制限値を算出し、それぞれ式(1)が成立することを照査する。

式(1)において、荷重組合せ係数と荷重係数を考慮して組み合わせた組合せ荷重が設計状況である。後述のように、変動作用が支配的な状況においては、設計供用期間の標準である100年を念頭に、供用期間中に橋が置かれ得る最も厳しい状況を代表できる荷重組合せの種類、そこで考慮する荷重組合せ係数や荷重係数が検討された。また、抵抗係数は、外力の確率水準とは関係なく、限界状態の評価の信頼性に着目して検討された。このような規定化構造を採ったことで、橋の耐荷性能として、外力の組み合

わせをどの程度の確率的な水準で想定しているのか、抵抗が発揮される過程をどのように、また、どの程度の信頼性で制御しようとしているのかをそれぞれで独立して説明できる。このように、「状況」と「状態」で分けた性能規定化の方法を採ったことは、それぞれに対応する部分係数を設定でき、安全余裕も荷重と抵抗で独立し、それぞれで、また、部分で見直せるという部分係数化のメリットを最大限生かせる。結果的に、道路橋示方書では、欧米の基準で検討されたようないわゆる信頼性指標ベータを満足するように荷重側と抵抗側の部分係数に関係性を持たせて調整するといった荷重係数や抵抗係数の決定方法は取らないことになる。

表-2 部分係数の種類

荷重 $P_i$ に乘じ、組合せ荷重を算出するための係数	
$\gamma_{pi}$	荷重 $i$ に乘じる組合せ係数であり、異なる荷重の同時載荷状況(組合せ)に応じて、設計で考慮する荷重の規模を補正する係数 例： 死荷重 1.00 活荷重 1.00~0.95 (組み合わせに応じて変わる) 温度変化の影響 1.00~0.50 (組み合わせに応じて変わる)
$\gamma_{qi}$	荷重 $i$ に乘じる荷重係数であり、荷重の特性値に対するばらつきに応じて、設計で考慮する荷重の規模を補正する係数 例： 死荷重 1.05 活荷重 1.25 温度変化の影響 1.00
抵抗値 $R$ に乘じ、抵抗の設計値を算出するための係数	
$\phi$	抵抗係数で、材料、施工、耐力式等の有する不確実性など、抵抗値の評価に直接関係する要因の確率統計的な信頼性の程度を考慮する係数
$\xi_1$	調査・解析係数であり、調査結果などに基づき橋の構造をモデル化し、断面力などの作用効果を算出する過程に含まれる不確実性を考慮する係数
$\xi_2$	部材・構造係数であり、曲げ損傷とせん断損傷の違いなどのように、部材の非弾性挙動特性の違いを考慮する係数

#### 4. 「状況」を表す部分係数

前述のとおり、設計状況を荷重の組み合わせで与えるために、荷重係数や荷重組合せ係数は、様々な橋の様々な断面において、荷重の組み合わせが作用した効果として100年間に生じ得る断面力の最大値を概ね評価できるように検討された。そして、設計供用期間中に橋が置かれる状況は、橋の形式や使用材料によらないのがその本質的な定義であるので、最終的に改定された道路橋示方書では、荷重に乘じる部分係数は、式(1)のとおり、橋の構造に依存す

る断面力等の荷重効果 $S$ に乘じられるものではなく、荷重の特性値 $P$ に直接考慮するものとされた。

荷重組合せは個々の荷重の単純和とはならず、荷重は、荷重組合せ係数で調整されて組み合わせられる。規定されているいずれの荷重組合せも、100年のうちに橋のいずれかの部材が最も厳しい状態に達し得る荷重同時載荷状況を代表している。例えば、表-2に示す荷重組合せ係数と荷重係数の合算で見れば、活荷重については、荷重組合せ毎に1.25~1.19の範囲で係数が乘じられる一方で、死荷重については1.05が乘じられる。このように、各荷重のばらつきの違いが荷重に乘じる部分係数として考慮されることで、部材毎に発生する断面力に寄与する荷重やそのばらつきの比率に応じて断面諸元が結果的に調整されるようになり、橋の部材を構成するうえで、よりの確に断面寸法が決定されると考えられる。また、活荷重に対しては従前と同等の安全余裕を確保しつつ、ばらつきの少ない死荷重に対して安全余裕が合理化される傾向が条件によっては現れると考えられる。

橋梁研究室では、これまで、活荷重に関して、自動車の同時載荷状況の実態調査やシミュレーションを行い、活荷重モデルの統計的な性質について調査して来ており<sup>1),2)</sup>、その成果は過去にも活荷重の見直しなどに反映されてきた。今回の改定では、幹線道路の車両重量分布計測を新たに行った<sup>3)</sup>。また、活荷重のみに限定せず、設計供用期間中に橋が実際に置かれる最も不利な状況としての工学的な意味合いを有する荷重組合せを検討するために、荷重同時載荷の時間変動を確率過程で模擬するモンテカルロシミュレーション方法を開発し、複数の橋に対してシミュレーションを行った。そして、組合せの100年最大値分布(極値分布)の非超過95%程度に対応する荷重組合せや組合せ毎に考慮される各荷重の内訳の概略の幅を求めた。最終的に、改定された道路橋示方書では、様々な経験的な要因や工学的判断、実務への便も考慮され、一連の荷重組合せやその内訳比率を与える部分係数値が規定された。

#### 5. 「限界状態」に考慮する部分係数

橋が置かれる外力環境は、本質的には橋の姿形とは無縁であり、その部分係数の設定は技術開発と関係づけることは困難である。一方、橋の構造形式、部材、材料、施工方法、さらには、構造をモデル化し荷重効果を把握するために必要な地盤調査方法や

構造解析方法は、これまでも、そして、これからも技術開発が期待されるものである。そこで、これらのデータの蓄積に応じて部分的にも安全率の見直しが可能になるように、構造や部材の抵抗特性の評価に関わる様々なばらつきをその要因毎に考慮できるとされる部分係数を導入することが国総研や土研にて研究され、その成果が反映された。

最終的に、改定された道路橋示方書においては、抵抗値 $R$ に乗じる部分係数は、式(1)や表-2に示したように、3つに分けて扱われるものとされた。抵抗係数 $\Phi$ は、状態が変化していく過程の再現性に係る信頼性を制御するために、限界状態を評価するにあたって直接関連するばらつきを評価するものである。今回の改定では、着目する抵抗値 $R$ のばらつきの95%が安全側に包含されることを念頭に、また、その他様々な配慮が行われ、各照査式で考慮される抵抗係数の値が設定された。

しかし、材料や部材を設計するのは、橋の性能を確保することが目的である。そこで、部材の破壊過程の特徴が橋の性能に与える影響にも着目し、個々の部材に必要な安全性を与えるための部分係数である部材・構造係数 $\xi_2$ が導入された。この係数は、たとえば、鋼部材のあと座屈挙動が座屈パラメータにより異なることや、コンクリート部材の非弾性挙動が曲げ又はせん断の損傷形態の違いにより異なることを反映するためのものである。以上の2つの係数には、新しい材料等についても、材料としての品質が明らかで、かつ、部材としての破壊過程が制御できる範囲が明らかなものについては、その範囲で用いることができる余地を含めている。このように、限界状態設計法や部分係数設計法を用いることで、許容応力度法に比べて、新しい材料や構造について、その採用にあたって少なくとも検証すべき事項が明確にされた。

調査・解析係数 $\xi_1$ は、将来的には式(1)の荷重効果 $S$ (橋の応答)の評価方法の高度化に応じて見直せるように、今回の改定では標準的には0.90とされ、今後の設計基準の合理化の余地がここに残された(なお抵抗値 $R$ を算出する構造解析の確からしさは、前述の抵抗係数 $\Phi$ に反映される)。この係数は、橋全体としての性能との関係性も考慮したうえで設定されるべきものであり、構造解析モデルを精緻にすることのみで係数値が見直せるものではない。この係数の設定の方法論は、今後の研究課題として残さ

れている。しかしながら、今回の改定においても、その先駆けとして、下部構造編において、基礎の設計における一部の規定で、地盤調査方法ごとに $\xi_1$ の値が与えられた。これは、地盤調査法に起因する地盤抵抗モデル設定の不確実性とそれが荷重効果の評価に与える影響が検討された結果に基づくものである。

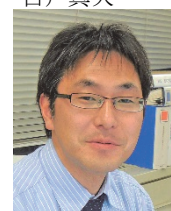
## 6. おわりに

以上のように、道路橋示方書では、性能に基づく技術基準の体系に適合するように、部分係数設計法や限界状態設計法が構築、導入された。部分係数設計法や限界状態設計法を導入することのみを目的としなかったことで、新たな時代に相応しく、また、普遍的な設計体系が構築できたと考えている。本稿が、改定の背景を理解する一助となることを期待したい。

### 参考文献

- 1) 金井道夫、佐藤和徳：橋梁活荷重の信頼性解析、土木研究所資料第1865号、1982
- 2) 藤原稔、岩崎泰彦、田中良樹：限界状態設計法における設計活荷重に関する検討、土木研究所資料第2539号、1988
- 3) 玉越隆史、中州啓太、石尾真理：道路橋の設計自動車荷重に関する試験調査報告書-全国活荷重実態調査-、国土技術政策総合研究所第295号、2006

白戸真大



国土交通省国土技術政策総合研究所  
道路構造物研究部橋梁研究室長、博士(工学)  
Dr. Masahiro SHIRATO