

性能照査型設計の現状分析と道路橋床版への応用に関する考察

The state of the art of Performance-Based Design Methods and Discussions on Its Application for Bridge Deck Design

秋元礼子*, 川畑篤敬**, 大田孝二***, 中原智法****, 内田大介*****, 田中千尋*****, 浜田純夫*****
Reiko AKIMOTO, Atsunori KAWABATA, Koji OHTA, Tomonori NAKAHARA, Daisuke UCHIDA, Chihiro TANAKA, Sumio HAMADA

*工修 パシフィックコンサルタンツ(株) プロジェクト本部 (〒206-8850 東京都多摩市関戸1丁目7-5)

**工修 JFE 日本鋼管株式会社 橋梁建設部 (〒230-8611, 神奈川県横浜市鶴見区末広町2丁目1)

***工博 ヤマト設計株式会社 (〒135-0031, 東京都江東区佐賀1丁目1-3)

****工修 日本橋梁株式会社 技術部 (〒675-0164, 兵庫県加古郡播磨町東新島3番地)

*****工修 三井造船株式会社 鉄構・物流事業本部 技術部 (〒104-8439, 東京都中央区築地5丁目6-4)

***** 株式会社富士ピー・エス 技術本部 設計部 (〒105-0004, 東京都港区新橋4丁目24-8)

*****工博 山口大学 工学部 (〒775-8611, 山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

For several years, it has been said that the introduction of a performance-based design method is necessary. A number of design specifications for certain types of structures, which are based on a concept of performance-based method, have been proposed. 'The design guideline of bridge decks' was also proposed by Japan Society of Civil Engineers. In this paper, the feature of these existing specifications is enumerated and the performance requirements for bridge decks are redefined. In addition, the problems at the practical use of the Performance-based design method of bridge-deck design are examined.

Based on the above-mentioned discussions, the authors propose a practicable application way of this design method, and compare it with the present design method of the bridge decks by the present "Specification for Highway Bridges".

Key words: Performance-based design method, Bridge deck, Required performance, Performance check

1. はじめに

平成14年度の道路橋示方書の書式が改訂され、道路橋の設計に際して要求される性能をできる限り条文化する方向に改められている。構造物を設計する場合に、期待される性能を実現することを目的として設計することは、至極当然といえる考え方である。すなわち、構造物の使用される状況を想定し、破壊に対する安全性を確保し、費用対効果が可能な限り高められるような耐久性を実現することを意図する設計手法が性能設計といえる。性能設計では、設計を具体化するために要求される性能を規定し、設計した構造物が規定された性能を満足していることを照査することで、設計が完結することとなる。これは、性能規定型設計、性能照査型設計などと呼ばれている。構造物の性能設計には、基本性能としての安全性や耐久性に加えて、構造物の使われ方や、建設される場所に応じて、供用性や経済性、そして環境との調和性などの性能が強く要求される場合も想定される。このため、性能設計には要求される性能の内容に対する関係者のコンセンサスが必要である。その内容をオーソライズするためには、何らかの指標の選択と要求値の規定が必要となる。そして、設計された構造物が要求された性能を満足していることを、何らかの方法で事前に照査しておくことも必要となる。このためには、性能を照査する方法についても、妥当性の検証と関係者のコンセンサスが必要と考えられる。

土木学会鋼構造委員会「鋼橋床版の調査研究小委員会 性能照査分科会」(平成12年10月)では、鋼橋床版の性能照査型設計指針(試案)を提案するとともに、鋼橋で使用されることの多いRC床版に対して指針を適用した計算例を示した。鋼橋床版の性能照査型設計指針(試案)では、鋼橋床版に要求される性能を、供用性能、耐荷力性能、疲労耐久性能、材料耐久性能、マネジメント性能の5つに分類し、各要求性能の意図を理解しやすいように性能項目を列挙した。しかしながら、各性能項目に対する要求レベルについては、関係者間の契約やコンセンサスに依存すると考えられる。このため、要求レベルとして平成8年版の道路橋示方書により設計される床版を想定しつつも、各性能項目に対して要求されるレベルを概念的な表現により記すに留まった。性能の照査方法については、道示の許容応力度設計法、コンクリート標準示方書の限界状態設計法を肯定しつつ、実験等による照査方法についても示したが、その具体的な方法については方向性を示すに留めていた。

また、指針を適用した計算例については、同じ幅員を有する橋梁を、それぞれ2主桁とした場合と4主桁とした場合について要求性能を照査することで床版の設計例を示した。しかしながら、照査範囲が多岐にわたることや、照査過程の複雑性を指摘する声も大きく、新形式の床版では、その適用性についての問題点が指摘されている。

平成 13 年末より、新たに召集された土木学会鋼構造委員会「道路橋床版の調査研究小委員会 第 2 分科会」では、前回の指針（試案）で指摘された課題を解決することにより、実務者が実際に使える道路橋床版の性能照査型設計指針をめざして活動を開始した。本論文では、性能照査型設計法により床版を設計する際の課題を明らかにするために、最近の各種性能照査型設計指針と比較することで、床版に関する要求性能を再度整理するとともに、性能照査型設計の適用上の課題を明らかにし、分科会としての活動の方向性について示すこととする。

2. 性能照査型設計の現状と道路橋床版

道路橋示方書において、新技術導入や技術基準の国際整合化に対する要請などから、性能照査型設計への移行が進められていることは既に述べたが、平成 14 年の改訂は、これまでの仕様規定を性能照査型の書式にあらためることに主眼をおいた第一段階の改訂であることから、実際の個別の構造に対する照査手法やその評価については具体的に記述されていない。そのため、現時点では従来の設計法からの逸脱がやや困難であり、性能照査型設計を一般に認知、普及するには至っていないといえる。一方、建築分野においては、建築基準法における性能規定表示によって、既に実用的なレベルでの性能照査型設計が導入されている他、土木分野においても、防護柵設置基準・同解説（平成 10 年 11 月）、舗装工事における性能規定発注方式導入（平成 10 年）など、着実に性能照査型を取り入れる方向となっている。

そのような中で、各種構造や材料に着目し、性能照査型設計を実務として取り入れるための提案・指針が関係機関によって作成されている。本章ではこれまでに提案された性能照査型設計に関し、次項 2.1 に示す 5 つの設計指針を取り上げてそれぞれの特徴や要求性能の捉え方を比較検証し、それらを踏まえて道路橋床版に必要な要求性能について整理するとともに、実際に道路橋床版の設計を行う上での問題点について述べる。さらに、床版の性能照査型設計に重要な概念となるライフサイクルコストの考え方についても触れる。なお、本論文で使用する用語は以下のように定義する。

要求性能：設計しようとする構造物が保有すべきであると要求される性能を表す。

性能項目：要求性能を細分化したもので、満たすべき要求性能を構成する項目を表す。

要求レベル：ここでは、性能項目が確保されることを必要とする構造物への作用の大きさを表す。

状態のレベル：作用の結果、構造物が到達する状態の程度を表す。

性能照査：応答値と対応する構造の保有性能限界値の間での判定を行う行為を表す。

照査指標：評価性能を具体的に表す物理量を表す。

みなし適合仕様：慣用の設計法による実績のある規定であり、これにより要求性能を満足するとみなすことができる。

2.1 性能照査型設計資料による要求性能の比較

ここでは最近出版された性能照査型の書式で書かれた設計指針をいくつか取り上げ、要求性能や要求レベル、性能照査方法および実際の設計がどのように規定され、実施されているかを調査し、新たな参考となる部分を調査する。対象とする設計指針は以下の 5 つである。

①「道路橋床版の性能照査型設計指針（案）」

土木学会 鋼橋床版調査研究小委員会 H12.10

②「コンクリート構造物の補強指針（案）」

土木学会 コンクリートライブラリ H11.9

③「土木鋼構造物の性能設計ガイドライン」

JSSC テクニカルレポート H13.10

④「コンクリート標準示方書 構造性能照査編」

土木学会 H14.3

⑤「複合構造物の性能照査指針（案）」

土木学会 構造工学シリーズ H14.10

一般に性能照査型設計は自由度は広く、新しい構造形式や技術の導入が行いやすいといわれている。しかし、現状の性能照査に関する基準類には抽象的な表現が多く、実務への反映が難しいという問題もある。ここでは、実際に設計業務を行うという立場からの評価も書き加えた。

各設計指針の概要は以下のとおりである。

① 道路橋床版の性能調査型設計指針（案）

鋼橋の床版を対象に、これまで道示に明確にされていなかった床版の要求性能、照査方法を明確に規定している。

要求性能は供用性能、耐荷力性能、疲労耐久性能、材料耐久性能、マネジメント性能の 5 つからなり、各要求性能を細分化した性能項目も同時に規定している。各々の性能項目に対応した要求レベル（例えば、作用の大きさや作用の応答値などで示す）も示されている。

照査方法とは、保有する性能が要求された性能を満たしていることを照査することであり、各照査指標によって、該当する床版の保有値が照査指標ごとに示されている性能項目の要求値を満たしているか否かで照査することになる。

実務設計の立場からみた評価：RC、PC 床版など床版の種別ごとに細かく性能項目が規定されており、RC では設計計算の例が示されている。しかし、すべての性能項目に対して適用方法が示されていない。規定されている照査項目が多く、工学的な検証が十分に行われている照査項目については、みなし規定の整備が必要であると思われる。

② コンクリート構造物の補強指針（案）

既設コンクリート構造物の補強、機能回復、機能向

上を行う場合を対象にしており、具体的には外ケーブル工法、巻きたて工法（鋼板接着、増厚）の2つを対象にして記述している。性能照査に関しては平成8年制定のコンクリート標準示方書に示されている照査の指標を基本として、性能およびその項目の枠組みを決定している。

要求性能としては、安全性、使用性、復旧性の3つを挙げている。安全性とは転倒や疲労を含めた各種の耐荷力、使用性には走行性、歩行性、振動や騒音、美観を含めている。復旧性とは残留変位、残留ひび割れ、コンクリートの損傷程度などを指標とした性能項目との説明がある。なお、耐久性については時間を介して全ての性能に関係するとの観点からあえて要求性能としては挙げていない。

照査方法のうち耐荷力などについては工法が限定的なため、用いる式や数字は具体的である。使用性の照査も同様である。復旧性についても同様で、変形や応力度が復旧性から定まる制限値以下であること、としている。補強の設計施工の方法を規定することにより重きをおいた仕様指針であり、性能照査に力点をおいた他の設計指針とは異なっているといえる。

実務設計の立場からみた評価：付属資料の中に補修床版の例として、既存の工法である炭素繊維接着、鋼板接着、増厚の例が掲載されており、具体的な設計に有用と思われる。

③ 土木鋼構造物の性能設計ガイドライン

性能照査型設計の背景や諸外国の調査も掲載され、同設計法の特徴や得失についてもまとめられている。

要求性能の表現を上位（一般の人が理解できるよう表現した要求性能）、中位（標準の技術者が理解できるよう定性的に表現した要求性能）、下位（標準の技術者が理解できるよう定量的に表現した要求性能）と分類している。また、構造物の要求性能に対応する限界状態への達し難さの程度として要求性能水準を定義し、信頼性理論に基づいた破壊確率あるいは信頼性指標の大小で定量的な分類を行っているのも特徴である。座屈や疲労、耐風、耐震など鋼構造の8つの分野に対して記述しており、今回の①以外の4つの設計指針のなかで唯一、床版を対象に記述されている。

要求性能は、安全性（耐久性を含む）、使用性、環境適合性、施工性、維持管理性、解体・再利用性からなるとしている。床版の分野における要求性能では上位、中位、下位に対する要求など、表現の差はあるが、設計の内容的には前述の道路橋床版の性能照査型設計（案）と異なる部分はない。

照査の表現としては、

応答値<限界値

で照査を行うという表現をとっている。

実務設計の立場からみた評価：性能照査型設計に正面から取り組んだ設計指針といえる。しかし、実務設計を行うには、理論的な記述はあっても、具体的な計算手法（応答値や限界値の算出方法）が述べられておらず、すぐに適用できる部分は少ない。

④ コンクリート標準示方書 構造性能照査編

従来のコンクリート標準示方書の設計編を性能照査型設計に書式を改めたものである。

表1 各種設計指針の比較

	道路橋床版の性能照査型設計指針(案):土木学会H12.10	コンクリート構造物の補強指針(案):土木学会H11.9	土木鋼構造物の性能設計ガイドライン:日本鋼構造協会H13.10	コンクリート標準示方書 構造性能照査編:土木学会H13.3	複合構造物の性能照査指針(案):土木学会H14.10
対象構造物	鋼道路橋床版	既設コンクリート構造物の補強	土木鋼構造物(床版の章あり)	コンクリート構造物	複合構造物
要求性能	供用性能、耐荷力性能、疲労耐久性能、材料耐久性能、マネジメント性能(5つ)	安全性、使用性、復旧性(3つ)	安全性、使用性、環境適合性、施工性、維持管理性、解体・再利用性(6つ)	安全性、使用性(2つ)	安全性、使用性、復旧性(3つ)
照査方法	照査指標の要求値に対して保有値が満足しているかを照査。	規定された性能照査項目に関して要求性能を保有しているかどうかを照査。	構造物の破壊確率と目標破壊確率の値の比較を理想としている。実際は部分安全係数法による照査。構造物の設計に関与する不確定要素を確率統計論で導入。	設計耐用期間にたいして安全率をみた設計値を限界値で除したものが1を下回ることを照査。	設計供用期間を設定し、照査項目に応じて限界状態を適切に対応付け、構造解析係数を乗じた照査用応答値を照査用限界値で除した値が1を下回ることを確認。
実設計への対応	一部について具体的な設計例が示されているが、照査手法の示されていない項目もある。	各工法について具体的な設計例があり有用であるが、照査指標が体系的に纏められていないため完全なものではない。	解析手法や統計学的手法等の理論的な説明はあるが具体的な計算例は示されていない。	コンクリート全般が対象であり、構造物に対する具体的な設計手法に関する情報が不足している。	一部について具体的な設計例が示されているが、照査手法の示されていない項目もある。

要求性能は安全性能、使用性能としているが、「コンクリート標準示方書施工編の耐久性照査と施工性能が満足されることが前提」とある。安全性能は静荷重のみを扱っており、疲労荷重ならびに地震荷重については別な取り扱いとなっている。(地震については道示、耐震編による、としている。)

照査の方法は基本的に設計耐用期間に対して

$$\gamma S \text{ (安全率を見た設計値)} < R \text{ (限界値)}$$

が成立することとしている。使用限界についても、設計荷重の下で使用限界状態に至らないこととしている。疲労についても梁・面部材など、研究がなされてきたものに対する記述はあるが、移動荷重を受ける床版については具体的な情報は得られない。

実務設計の立場からみた評価：コンクリート全般についての記述が多いため、特定の構造物(床版など)を設計する場合にどの範囲での検討が必要かは明確でない。具体的な設計手法に対する情報が不足しており、別途設計マニュアル的な指針などを参考にする必要がある。

⑤ 複合構造物の性能照査指針(案)

橋脚等の橋梁構造を含めた複合構造を対象としている。

要求性能は、安全性、使用性、復旧性を挙げており、目標性能の項目として安全性では構造物または部材の破壊・崩壊、使用性では使用上の快適性、第三者影響度、遮蔽・透過性の3項目を、復旧性では偶発荷重による損傷後の性能の回復を挙げている。復旧性については作用する荷重の大きさに応じ、3つのレベルを示している。また、耐久性は②と同様の観点から独立した要求性能としては扱っていない。

性能照査は、目標性能に対する限界状態を設定し、限界状態に対応するような応答値が得られるような数値計算法を用いてその限界状態を照査するのがよい、としている。床版は念頭においていないと思われる。実務設計の立場からみた評価：合成構造の例では、破壊などの安全性の照査に対して、設計断面力や断面計算の考え方が明確に記されているが、使用性の照査に関しては、走行性などの具体的な照査方法は記述されておらず、設計へ直接適用するには難しい部分もある。

以上、5種類の設計指針について比較を行った。対象とする構造物が異なることもあるが、用語の定義、要求性能に対する考え方に違いが見られた。照査方法については、表現方法は異なるが基本的には限界状態設計法を用いているようである。また、実設計への適用については各設計指針とも完成度に差はあるがこのまま適用することは難しい。これは照査指標の体系的な整理が完全なものでないためであると考えられる。

また、経済的な合理性や維持管理の面に関する記述は全体に乏しかった。

表1に各基準類の比較結果を示す。

2.2 道路橋床版における要求性能

2.1における比較結果から判断すると、対象とする構造物が異なる場合においても、安全性、使用性、社会・環境適合性などの基本性能は同一である。一方、設計の実務において、これらの基本性能は、対象とする構造物に対応して、耐荷力や疲労耐久性などの具体的な性能として表現する必要がある。

ここでは、道路橋床版の性能照査型設計指針(案)で取り上げた5つの性能に対し、既存の設計指針の比較結果を基に、上位の基本性能(安全性、使用性、社会環境適合性)に着目した床版の性能の分類、マネジメント性能の具体化(経済性の確保と維持管理行い易さ)、等の見直しをおこない、道路橋床版の要求性能として図1に示すように整理する。

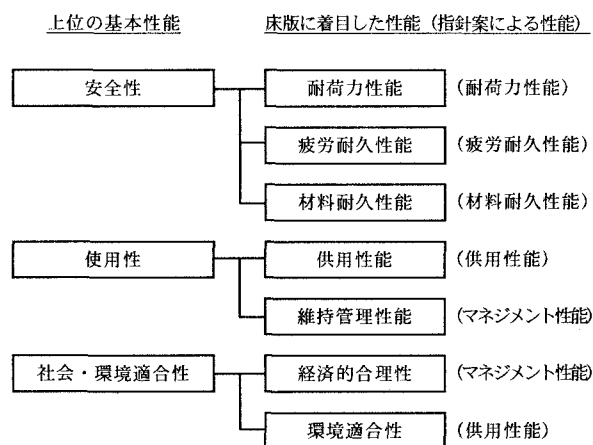


図1 道路橋床版の要求性能

2.3 道路橋床版の性能照査型設計における問題点

道路橋床版の調査研究小委員会第2分科会では、「道路橋床版の性能照査型設計指針(案)」により実際の床版に対する性能照査を試みているが、この中で、本指針を実用設計に用いるための問題が具体化してきている。ここでは、性能照査設計の実施にあたり、解決すべき問題点と今後の方向性を述べる。

① 実用性への対応

要求レベルの考え方や性能照査方法などについて、実際の設計での適用性を高めるため、マニュアルやみなし適合仕様、設計計算例を整備するなど、実設計への配慮が求められる。

② 要求レベルの具体化

照査すべき要求レベルが定義されていないため、結果的に全ての項目で常に同じレベルでの性能を必要とするような表現となっている。実際には橋梁の重要度や供用される環境などを考慮した上での要求レベルの設定が不可欠である。

③ 損傷事例と性能照査方法

例えば、道路橋床版の疲労耐久性に関しては、明確な設計手法の確立を目指し、輪荷重走行試験による損傷発生機構の検証が各機関によって行われている。疲労損傷は道路橋床版にとって極めて重要な要素である

ことから、これらの結果に対し、規定する要求性能が損傷を防ぐものとして適切であるか、疲労耐久性以外の性能が上記試験および損傷に関与する可能性はないか、などの検証が、設計手法としての要求性能を定義する上で必要である。

④ 既設構造物の要求性能

道路橋床版の性能照査型設計指針（案）は新設床版を意図した設計指針であるが、既存床版に対する補修補強設計の需要はきわめて高い。実用上の問題として、既存床版に新設と同様の性能を要求することは困難であることから、補修補強に対する要求性能を、新設とは異なった観点から定義することが必要である。

2.4 性能照査型設計とライフサイクルコスト

性能照査型設計にあたっては要求以上の性能を満たすことが求められるが、高い性能をもたせることにより、必要コストが上昇する。従って、ただ高い性能を与えるのではなく、構造物の供用期間全体にわたって適正な性能にかかるライフサイクルコストの見極めが重要になる。このことは、従来の仕様規定型設計では重要視されておらず、2.1 で述べた既存の性能照査型設計指針でも、あまり触れられていない。さらに、道路橋床版においては時間の経過による損傷が顕著であり、取替えや補修補強が全体のコストに与える影響が大きいため、ライフサイクルコストは床版には特に重要な概念である。

一般にライフサイクルコストは次式で与えられる。

$$C_t = C_i + C_m(t) + \text{ph} \cdot \text{pf} \cdot C_r \quad (1)$$

$$C_t = C_i + C_m(t) + \text{ph}(t) \cdot \text{pf}(t) \cdot C_r \quad (2)$$

ここで、 C_t 、 C_i 、 $C_m(t)$ はそれぞれライフサイクルコスト、初期建設コスト、補修・取替コストである。初期建設コストは経年にかかわらず一定である。一方、床版は時間が経つほど損傷が大きくなることから、補修コストは時間と共に大きくなる。図2⁵⁾はコンクリート構造物の使用時間と性能低下の関係を示しており、時間の経過により、急激に劣化が進行する時点があることがわかる。その結果、補修コストも急激に上昇する可能性がある。

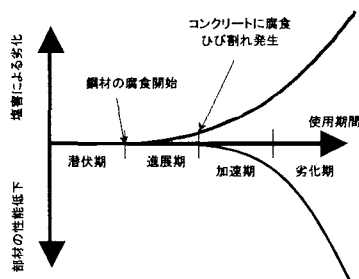


図2 RC構造物の使用期間と性能低下⁵⁾

C_r は、ハザード（予期できない荷重や機能変更、地震などの突発的な事象）が発生した場合の所定の被害に伴う損失額を表し、ハザードが発生する確率 $\text{ph}(t)$

とハザードが発生した時に所要の被害が発生する破壊確率 pf との積を合わせてリスクコストと呼ぶ。これは、安全な床版を作るには、疲労や耐久性とは別の観点のリスクも考える必要があることを示す。

これらのリスクが時間の関数でないときは式(1)に基づいて初期建設コストをわずかに増大させて破壊確率を小さくすることでリスクコストは急激に減少するので、トータルのコストが最小となる可能性が高い。しかし、設計供用期間が長い場合などにおいては、式(2)のようにリスクは時間の関数となり、ハザードが発生する可能性はかなり高くなる。リスクコストには人命や社会的機能の損失によるコストも含まれるため、社会・経済の変化も考慮し、時間と共にハザードの可能性を高く見る必要がある。

以上より、補修コストとリスクコストは時間の関数であり、ライフサイクルコストは時間の関数として捉える必要があると言える。

本来、補修・取替コストおよびリスクコストには、構造物に対する費用のみでなく、人命の損失や交通規制や渋滞による経済的損失も含まれる。これらの社会的損失は、その影響が極めて大きいにもかかわらず、算出期間や算定手法、評価に対するコンセンサスが確立されていないため、真のライフサイクルコストを求めることは現状では困難である。

しかしながら、道路橋床版の場合、ハザードによる損傷・打替えの可能性に加え、コンクリート材料の劣化や、交通荷重による疲労損傷による打替えを前提とするものも存在する。このことが床版そのものの評価に大きく影響することは明らかであり、本来、これらを含めたライフサイクルコストを検証すべきである。

3. 道路橋床版の要求レベル

前章において整理した床版の要求性能と性能照査型設計における問題点踏まえ、①実用性への対応と、②要求レベルの具体化を行うために、実在する床版の保有する性能とそのレベルを明らかにし、目標性能を把握した上で、性能照査を行うための要求レベル（作用レベル）を設定することが有効であると考えられる。

ここでは、今後の要求レベル設定の基礎資料とするため、平成14年3月に改訂された道路橋示方書の分析を行って、道示床版の保有する性能を定量的に評価する。分析にあたっては、鋼橋編でRC床版を、コンクリート橋編でPC床版を対象とする。また、活荷重による疲労耐久性を例に、要求レベルの設定と照査方法の事例を示す。

3.1 道路橋示方書における床版の保有レベル

(1) 鋼橋編

平成14年3月の改訂により、道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編では、書式が性能照査型に改められた。8.1.2設計一般では、「活荷重等の影響に対して安全であるこ

と」という条文により、耐荷力性能と疲労耐久性能が明確に要求されることとなった。また、構造上あるいは設計上の必要性に応じて「荷重分配作用に対する安全性」、「横荷重に対する安全性」を満足させることとなった。また、材料耐久性については言及されていないが、コンクリート橋編の関連規定を参照することとなっており、道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編 5章耐久性の検討により、塩害に対する検討を行って、最小かぶり厚を求めるとともに、19章に示される施工を行うことによって、中性化、凍結融解作用、化学的侵食に対する性能を確保することとしている。

平成14年3月版の道示で設計される車道部の床版は、最小全厚を160mmとしている。一般には複鉄筋で設計され、中立軸位置は床版圧縮縁から床版厚の約 $1/3$ ¹⁰⁾となる。

鉄筋コンクリート床版の設計基準強度は 24N/mm^2 以上であるため、鉄筋比を2%とした場合の設計押し抜きせん断耐力は495kNとなる。これは、衝撃係数を0.4とした設計輪荷重140kNに対して、約3.5倍の安全率を有することとなる。次に、疲労耐久性について、現行道示とほぼ同様な設計がなされた昭和48年道示床版に対して全国平均の荷重頻度分布から計算された疲労破壊寿命920年¹¹⁾を、計算押し抜きせん断耐力比0.796とS-N曲線の傾き11.21で補正すると、最小版厚床版の疲労破壊寿命は71年となる。同様に、活荷重たわみが引張側コンクリートを無視した版の計算値と等しくなる寿命500年を計算押し抜きせん断耐力比0.796とS-N曲線の傾き10.66で補正すると、44年となる。したがって、雨水の著しい浸入がないものとするれば、現行床版の疲労耐久性は40年以上確保されることが考えられる。

次に、大型車の交通量が多い路線では、RC床版の厚さを最大25%割増することが推奨されており最小床版厚は200mmとなる。この場合について、同様に疲労耐久性を推定する。昭和48年道示床版に対して大型車混入率大きな路線の荷重頻度分布から計算された疲労破壊寿命が46.3年¹¹⁾となるため、計算押し抜きせん断耐力比1.278とS-N曲線の傾き11.21で補正すると、最小版厚床版の疲労破壊寿命は726年となる。同様に、活荷重たわみが引張側コンクリートを無視した版の計算値と等しくなる寿命26.5年を計算押し抜きせん断耐力比1.278とS-N曲線の傾き10.66で補正すると、363年となる。したがって、雨水の著しい浸入がないものとするれば、床版厚を25%割増すことで、大型車の交通量が多い路線でも十分な疲労耐久性が確保されることになる。

以上より、現行のRC床版については、設計荷重に対して3.5倍以上の耐荷力、適切な防水層が施工されることを前提として40年以上の疲労耐久性を保有している。なお、材料的な耐久については以下に示すコンクリート橋編で述べる。

(2) コンクリート橋編

平成14年3月の改訂により、コンクリート橋編も鋼橋編と同様に性能照査型の表記に移行した。平成8年版の道路橋示方書は設計の仕様書的な要素が強く、設計手法、材料、構造など、具体的に仕様を規定したものであった。それに対し、平成14年版の示方書は、構造物に要求する事項とそれを満たす従来からの規定とを併記する書式となっており、要求性能を満足するのであれば必ずしも規定値に従わなくてもよいという柔軟な基準になっている。また、耐久性のさらなる向上を図るため、コンクリート橋編には塩害地域におけるかぶり規定等が新たに盛り込まれている。

平成14年3月改訂の示方書では、車道部のPC床版およびRC床版の最小全厚はともに160mmとされている。ただし、PC床版の場合、プレストレスにより十分な押しぬきせん断耐荷力と疲労耐久性が確保されると考えられるため¹²⁾、大型車交通量の多い道路においても最小版厚を増加させる必要がないものとされている。荷重が作用しても、プレストレスにより、コンクリートにひびわれが生じないため、せん断面が十分確保されることになり、RC床版に比べて大きな疲労耐久性を有すると考えられる。疲労耐久性に着目した場合、最小全厚を小さくすることができるが、最小全厚を極端に小さくすると、コンクリートの施工性が劣り、たわみや振動などの供用性の低下や、これにともなう低周波騒音などの弊害が起り得る。そのため、現行の示方書では、設計荷重に対する耐荷力や疲労耐久性、供用性、さらには施工性等の観点から、最小全厚が160mmに設定されているものと考えられる。

現行の道示より床版厚160mmのフルプレストレス床版を製作した場合、東山・松井らの式¹²⁾により算定される設計押し抜きせん断耐力は、1193kNとなる。これは衝撃係数を0.4とした設計輪荷重140kNに対して、約8.5倍の安全率を有することになる。また、実際に静的載荷試験をおこなった場合、試験結果から得られる押し抜きせん断耐力は1215kNであり、設計輪荷重98kNに対して約12.4倍の安全率を有することになる。衝撃係数を0.4とした設計輪荷重140kNに対して、約8.7倍の安全率を有することになる。プレストレスの導入により、大幅に押し抜きせん断耐力が増加するといえる。

現行の道示では、近年、耐久性能の一つとして重要視されている塩害の影響の程度に応じてかぶり厚が規定されている。ここで、高流動セメントを使用し、水セメント比36%、かぶり50mmとした標準的な工場製PC床版を海岸から250mの場所に設置した場合を例にとる。コンクリート標準示方書の塩化物イオンに対する拡散係数をもとに試算すると、本PC床版は表面に損傷が生じない状態、言い換えれば、鋼材位置での塩分含有量(塩化物イオン濃度)が 1.2kg/m^3 未満の状態ですべて77年間塩害に耐え得ることになる。なお、過去の実

績¹³⁾から、鋼材位置での塩分含有量が2.5kg/m³程度以上であれば補修を行うのが望ましいが、1.2kg/m³~2.5kg/m³の範囲では補修の必要はないとされている¹⁴⁾。前述の仮定のもと、本PC床版が100年経過した時点での塩化物イオン濃度は1.37kg/m³、200年経過した時点での塩化物イオン濃度は1.80kg/m³であり、塩害地域における構造物として十分な耐久性をもつものといえる。

以上より、現行の道示により設計されるPC床版は、設計輪荷重に対して約8.7倍の大きな耐荷力を有している。また、塩害地域に設定されているかぶり厚から逆算した材料耐久性は、表面に損傷が生じない状態で77年であり、その後も長期にわたり材料耐久性を有するものと考えられる。

3.2 要求レベルの設定事例

(1) 性能項目と照査指標

要求性能は、満たすべき内容を細分化した複数の性能項目からなる。性能照査にあたっては、各々の性能項目に対して照査を実施することとなるが、その際、照査指標となる物理量などが必要であり、満たすべき性能の特性と照査指標の相関性や、実用上の明確さを考慮して、設計指針の中で定義することが求められる。

表2に、道路橋床版が満たすべき性能項目とその照査指標の案を示す。

表2 性能項目と照査指標 (案)

要求性能		性能項目	指標		
使用性	供用性	歩行性	振動数		
		車両走行性	活荷重たわみ		
		耐振動性	振動状態		
		排水性	降雨処理能力		
		耐凍結性	路面温度差		
		低騒音性			
		形状保持	可否		
	維持管理性	点検	容易/可能/困難		
		劣化判定	容易/可能/困難		
		補修・補強	容易/可能/困難		
		安全性	耐荷力性	死荷重	降伏安全率
				活荷重	降伏安全率
				分配荷重	降伏安全率
				水平荷重	降伏安全率
疲労耐久性	施工荷重	活荷重	降伏安全率		
		その他の荷重	S-N曲線		
材料耐久性	鋼材の耐久性	塗装耐用年数			
		塩化物イオン濃度 中性化			
	コンクリートの耐久性	凍結融解			
		アルカリ骨材反応			
	その他				
社会・環境 適合性	経済的合理性	LCC	コスト		
	環境的適合性	環境負荷(LCA)	CO2排出量 等		

(2) 要求レベルの設定例

要求レベルとは、ひとつの性能項目が確保されるべき作用のレベルを表す。すなわち、ある作用レベルのもとで性能項目が満たすべき状態となることが要求性能の確保を意味する。

従って、各々の性能項目に対し、要求レベルと満たすべき状態の組合せを定義することが必要である。

図3に道路橋示方書V耐震設計編における橋の耐震性能と要求レベルの組合せ、および道路橋床版の疲労耐久性における要求性能と要求レベルの組合せの例を示す。

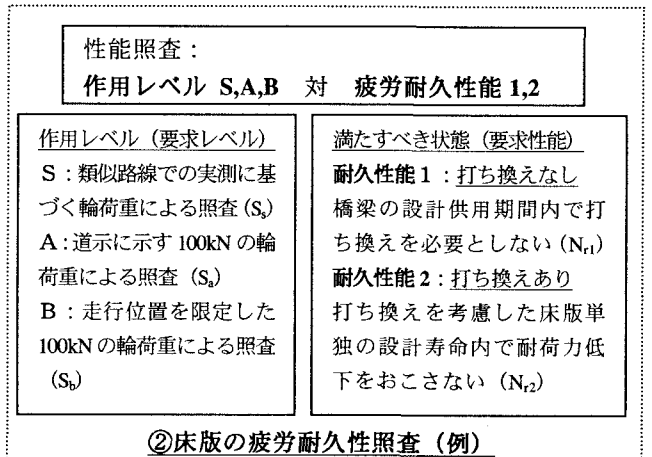
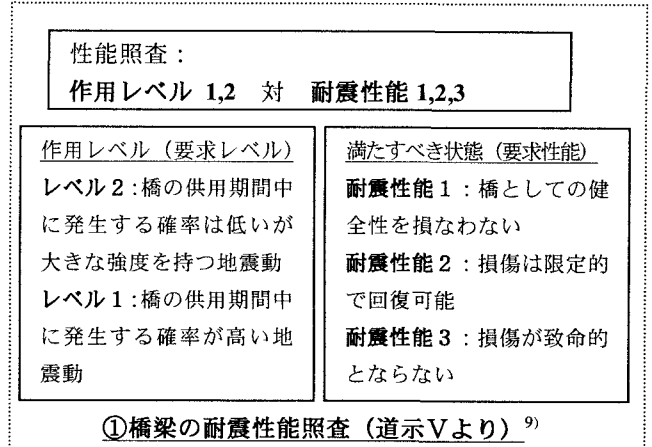


図3 要求レベルの考え方の事例

床版の疲労耐久性照査 (例) では、要求レベルとして S, A, B の3種類に分けることが考えられる。

ここでは、要求レベルの設定基準の例として、道路橋示方書における規定などの、これまでの用いられてきた仕様によるレベルをAクラスと定義し、それ以上の性能が必要となるものをSクラス、機能が限定的であるものをBクラスとした。また、要求性能の例として、耐荷力を確保すべき期間に着目し、床版の打ち換えを考慮する (床版の設計寿命での確保) 場合と、打ち換えを考えない (橋梁の設計供用期間での確保) 場合を考えた。

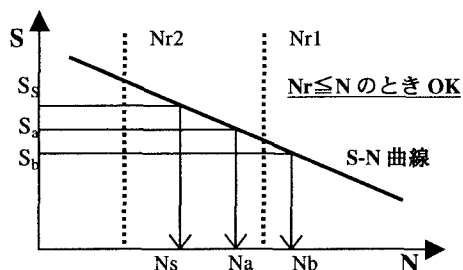
なお、レベルの設定にあたっては、設計者が要求レベルと満たすべき状態をどのように組み合わせる用いることが合理的かを考慮する必要がある。あわせて道路橋示方書等に明記されていない性能項目に関しては、既存の設計成果などから、床版の現状のレベルを踏まえた上で、基準となるレベルを設定してゆくことも必要である。

(3) 照査方法・照査指標の選定事例

性能照査にあたっては、照査指標の設定が必要であることは既に述べたが、照査指標の選定にあたっては、対象構造物の応答と指標となる物理現象との相関性や、確保すべき性能との相関性が十分に証明されることが重要である。

疲労耐久性能を例にとると、疲労の照査には S-N 曲線を用いることが一般的であるが、図 3 に示す要求性能に対しては、照査指標として、使用限界状態の S-N 曲線を用いることが考えられる。

RC 床版など、既存の床版構造に対しては、輪荷重走行試験により得られた S-N 曲線を用いて照査することも可能であるが、過去に例のない床版を用いる場合、輪荷重走行試験を実施して S-N 曲線を作成する必要がある。輪荷重走行試験の実施にあたっては、試験の効率化の観点から、階段状荷重漸増載荷などの実績のある試験方法の導入も考えられるが、照査すべき性能との関連性に注意して実施すべきである。



S: 要求レベルごとの等価な作用の大きさ
N: S が作用して限界状態に至る回数
Nr: 要求性能ごとの作用の繰返し回数

図 4 S-N 曲線と要求レベル・要求性能の概念

4. 今後の活動方針

本論文では、実際に道路橋床版の性能照査を実施するにあたって、設計指針を整備する立場から、現在の問題点を述べた。

今後はまず、性能項目ごとの①要求レベル、②要求レベルと満たすべき状態の組合せ、③照査指標の設定を行い、設計指針としての完成度を高めた上で、設計マニュアルや計算事例の充実を図る。

また、損傷事例や輪荷重走行試験結果との整合性検証や既設床版に対する要求性能の検討、ライフサイクルコストの体系的な評価方法について、さらに幅広い検討を継続する方針である。

参考文献

- 1) 道路橋床版の性能照査型設計指針(案), (社)土木学会, H12.10
- 2) コンクリート構造物の補強指針(案), (社)土木学会, H11.9
- 3) 土木鋼構造物の性能設計ガイドライン, (社)日本鋼構造協会, H13.10
- 4) コンクリート標準示方書 構造性能照査編, (社)土木学会, H14.3
- 5) コンクリート標準示方書 維持管理編, (社)土木学会, H14.3
- 6) 複合構造物の性能照査指針(案), (社)土木学会, H14.10
- 7) 道路橋示方書 II 鋼橋編, (社)日本道路協会, H14.3
- 8) 道路橋示方書 III コンクリート橋編, (社)日本道路協会, H14.3
- 9) 道路橋示方書 V 耐震設計編, (社)日本道路協会, H14.3
- 10) '01 デザインデータブック, (社)日本橋梁建設協会, H13.4, pp45
- 11) 既存橋梁の耐荷力と耐久性, (社)土木学会関西支部, S60.7, pp85~8
- 12) 東山浩士・松井繁之・水越陸視: PC 床版の押し抜きせん断耐力算定式に関する検討, 構造工学論文集 Vol.47A, pp.1347~1354, 2001.3.
- 13) コンクリートの耐久性向上技術の開発, (財)土木研究センター, 平成元年 5 月, pp67
- 14) コンクリート構造物の健全度診断技術の開発に関する共同研究報告書—コンクリート構造物の健全度診断マニュアル(案)— 共同研究報告書整理番号第 195 号, 建設省土木研究所材料施工部 コンクリート研究室 日本構造物診断技術協会, 平成 10 年 3 月
- 15) 横山・齋藤・大村・続石: 道路橋におけるライフサイクルコストの考え方と米国の事例, 第 1 回 鋼構造物の維持管理に関するシンポジウム, 平成 11 年 7 月