

鋼橋における性能を基盤にした設計体系への取り組み

PERFORMANCE-BASED DESIGN SYSTEM FOR STEEL BRIDGES

市川篤司

Atsushi ICHIKAWA

ABSTRACT It is said that the new technologies will be applied more easily in the performance-based design system than in the conventional design system. There have been many discussions about this. And there are many subjects to build the new design system.

“Sub-committee of Performance-Based Design System for Steel Structure” was set up last year, and the new design system for steel bridge has been discussed in this sub-committee. This paper was prepared for the discussion in the sub-committee, and a concept of performance-based design system for steel bridge is introduced and discussed.

KEYWORDS : 鋼橋, 設計基準, 性能照査型設計体系

Steel Bridge, Design Standard, Performance-Based Design System

1. はじめに

近年、構造物に対する新しい技術の開発や新しい構造の提案がなされる一方で、バブル経済の崩壊など社会情勢の変化とともに、構造物を取り巻く環境が大きく変化しようとしている。このような中で、「現在の技術基準は、従来型の構造、材料および設計計算手法を前提に、具体的な材料、寸法を指定する仕様書的な規定となっているために、新しい技術に対して、十分に対応できなくなっている。これらに対応できる設計法として、性能を基盤にした設計法、すなわち構造物に対して要求すべき性能を明確にした設計法が必要である」という主張があり様々な議論が行われている^{1), 2), 3)}。しかし、性能を基盤にした設計法と言ってもその捉え方は人によってまちまちで、具体的なイメージさえなかなか掴みきれないのが現状である。

このような中で、鋼構造委員会でも昨年「鋼構造物の性能照査型設計法に関する調査特別小委員会」を設立し、性能を基盤にした性能照査型設計体系の構築に向けての議論を始めた。本文は、昨年上記委員会で議論を進めていく上でのたたき台にする目的で、筆者のイメージをまとめたものである。その後様々な議論が行われ変更すべき点多々あるが、上記委員会での議論の概要を把握していただけるものと考えている。

2. 性能を基盤にした設計体系の概念

2.1 現行の設計体系の問題点

現行の設計法は、許容応力度設計法も限界状態設計法も、前者は発生する応力度に制限を設けることによって安全性の照査を行っており、後者は終局限界状態、使用限界状態等のあらかじめ設定された限界に対して照査を行うなど、基本的には何らかの性能を満足することを照査する体系になってい

る。しかしながら、これらの設計法は、許容応力度を超えないというようなプリミティブな目標性能はあるものの、本質的には性能規定と材料等を具体的に定める仕様規定が渾然一体となっており、それらの詳細な規定が設計上の制約になり、新しい技術の発展の障害に繋がっていることが問題点の一つと言われている¹⁾。

すなわち、現行の設計体系では、設計に用いる外力（荷重）や許容応力度、許容変形量等の値、設計計算の方法は規定されているものの、必ずしも構造物に対してどのような性能を要求しているかを明確にしておらず、設計された構造物がどの程度の性能を保有しているかも明確ではない。したがって、①使用できる材料が定められているために新しい材料が使いづらい、②新しい構造はその設計手法が定められていないために使いづらい、③性能が明確ではないゆえにどこに着目して技術開発を行うべきかがわかりづらい、④これらが新しい技術の発展の障害になっているといった指摘である。

2. 2 性能を基盤にした設計体系に対する期待

2. 1に述べたようなことから、必要とされる性能のみを規定し、その性能を実現するための方法を原則的に自由にするにより、新材料、新技術の利用を促進し、より経済的な設計を可能にするような「性能を基盤にした設計体系」が求められるようになった¹⁾。すなわち、性能を基盤にした設計体系は、設計上の自由度を増やし新技術の利用を促進すること、および経済的な設計を可能にすること等が期待される設計体系である。具体的には、以下のような利点が考えられる。

① 荷重作用に対する安全性の検討、耐久性設計、景観設計、施工計画等を同一のコンセプトで統一的に扱うことができる。

② 設計の自由度が増す。

③ 技術発展のレベルに応じた合理的な設計が可能になる。

④ 新しい技術の導入が容易になる。

⑤ これらによりコストダウンが可能になる。

したがって、性能を基盤にした設計体系を導入する場合には、これらの利点が最大限得られるような設計システムを構築する必要がある。特に、如何にコストダウンに結びつけていくかが重要であろう。

2. 3 性能を基盤にした設計体系を構築する上での基本的な考え方

2. 2に述べたように、現在期待されているのは、必要とする性能を規定し、その実現方法を原則的には自由にして新材料、新技術の利用を促進し、コストダウンを可能にする設計体系である。これをどのように具体化して体系化していくかは今後の大きな課題であるが、現在以下のような考え方で議論を進めている。

① 性能を基盤にした設計体系では、設計・製作・架設のみならず、維持管理までを含めた時間軸を考慮した設計体系の構築を目指す。

② このような設計体系を導入することにより、コストダウンを図り易くする必要がある。そのためには、ライフサイクルコストを考慮したコストパフォーマンスの概念を十分に反映できるものにする必要がある。そのために契約方式等、現在の社会の仕組みにも目を向ける。

③ 性能には社会、行政、事業者、設計者等の各段階で様々なレベルのものが考えられる。

ここでは、性能を橋梁に要求される要件である要求性能と、それを実現するための具体的な目標値である目標性能、さらには完成時の性能を保有性能に分類して考える¹⁾（図1）。その理由は以下のとおりである。

・性能に対する整理および理解が容易になること。

・国、事業者等の段階毎に設計基準を定めやすいこと。例えば、省令や通達等の上位規定に要求性能を明確に規定し、その下に制定される実際の設計に用いる基準に、要求性能を満足するような目標性能を設定するようなことが考えられる。

・設計時と完成後の性能の違いを評価する場合に、保有性能の概念が必要なこと。

④ 性能の照査方法は、基本的には以下のように考える。

・構造物を取り巻く荷重、環境作用のもとで規定された性能が満足されることを、照査や検査などによって確認することにより行う。

・性能は、設計耐用年数中それが満たされなければならない。したがって、設計耐用年数中それが満たされることを何らかの形で照査する。

⑤ 要求性能を達成するための照査方法は、技術の進展とともに適用範囲や信頼性が変化するものである。また、構造や材料の種別ごとにも異なるものである。したがって、設計法および照査方法は、その時点の技術水準を反映したものに逐次改訂できるように配慮する。

⑥ 現在の技術レベル、設計を取り巻く環境を考慮すると、規定された性能の実現方法を全て自由にするのは必ずしも現実的ではない。当面の現実的な方法として、性能を満たすように検証する標準的な手法を示すことも部分的には必要になると考えられる（見なし規定）。また、例えば定められた構造細目を適用すれば疲労等の影響を考慮しなくてよいといった、これまでの長い間の経験から得られた所定の方法に従うことで確実に要求性能が満足されることが考えられる場合には照査を省くことができる（構造規定）。

以上のような性能を基盤にした設計体系のうち基準の構成のイメージを図1に示す。また、図2に、性能を基盤にした設計体系全体の流れを示す。

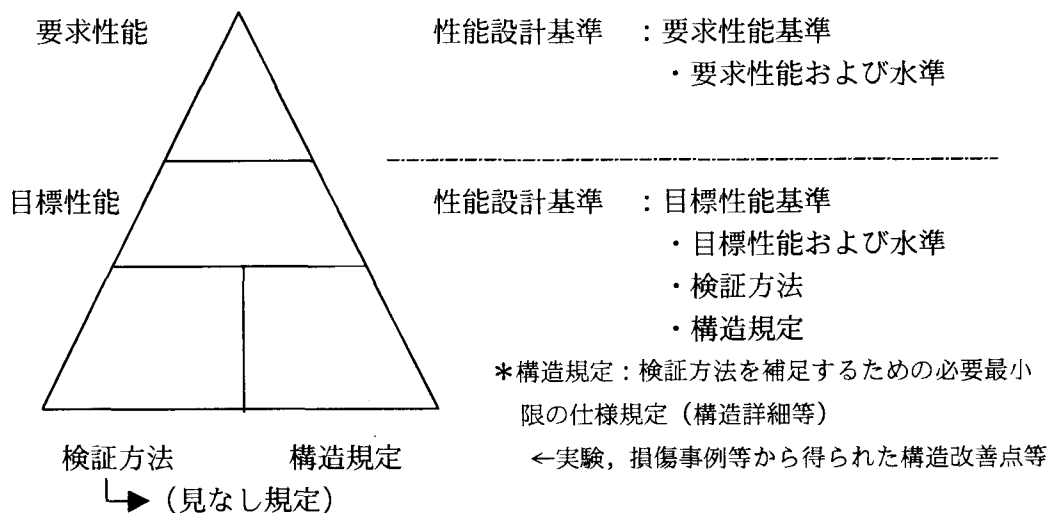


図1 性能を基盤にした設計基準の構成のイメージ

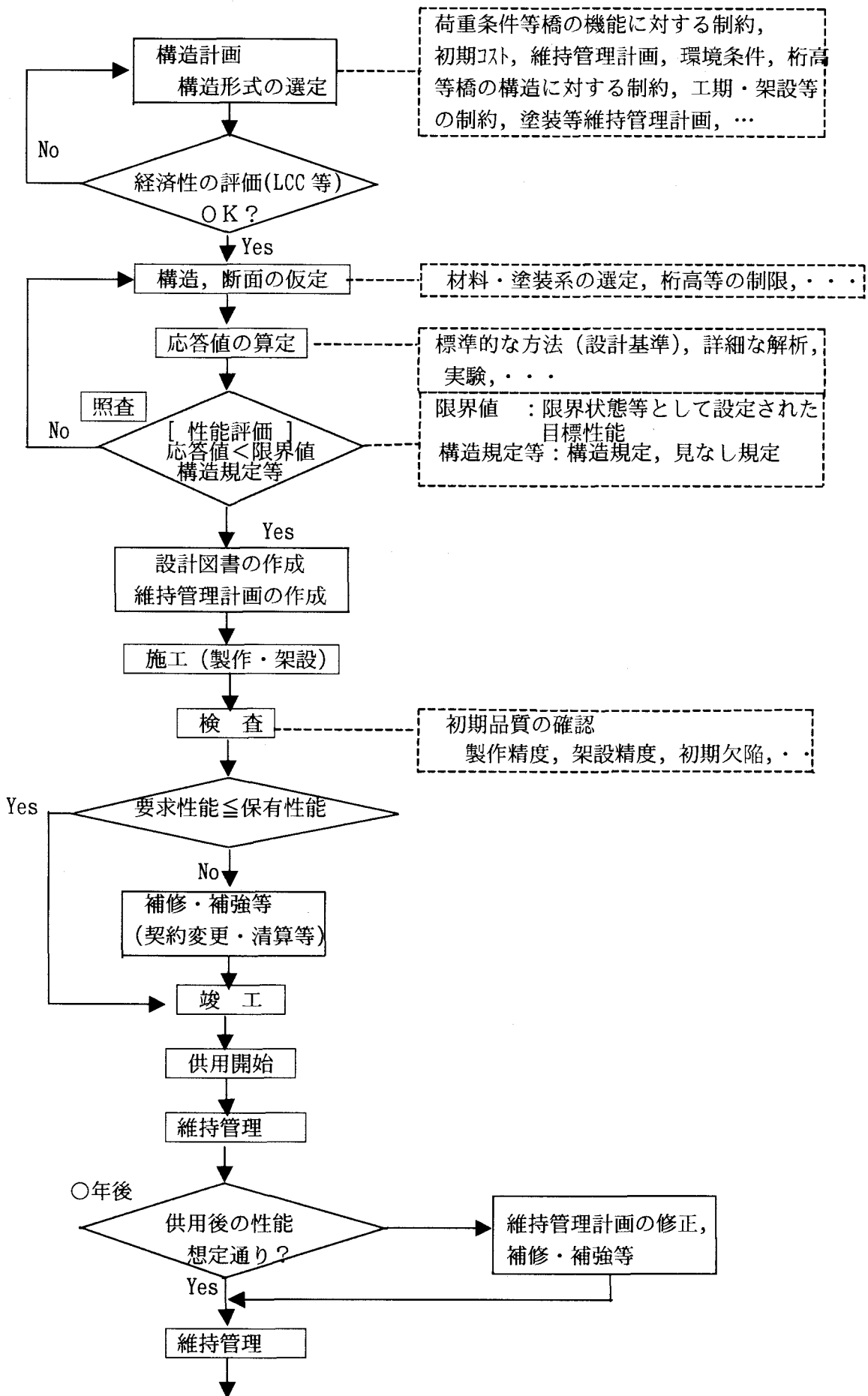


図2 性能を基盤にした設計体系の流れ

3. 鋼橋の性能

構造物の性能には、様々なものがあり誰もが納得できるように分類・表現されているわけではないが、例えば表1のような分類が考えられる。なお、「鋼構造物の性能照査型設計法に関する調査特別小委員会」では、この鋼橋の性能を整理し明示すべく現在盛んに議論を行っている。

表1 一般的な性能と照査指標

要求性能		目標性能	精緻な照査指標あるいは照査の方法	簡便な照査指標あるいは照査の方法
分類	項目			
用途・機能に係わる性能	構造	支間、桁下空間、建築限界等の要件	左記要件の遵守	
使用性に係わる性能	乗り心地	乗り心地レベルの設定	加速度等	たわみ、折れ角、振動レベル等
安全性に係わる性能	荷重作用	各種終局限界状態の設定	有限要素法等により、荷重作用による応答値で評価	現行示方書に準じる
	耐震	表2		
耐久性に係わる性能		疲労：表3		
		腐食：表4		
維持管理に係わる性能		点検の容易さ	点検が可能か、点検設備があるか等	
施工に係わる性能		製作精度の設定	左記製作精度を満たしているか	
		溶接部許容初期欠陥の設定	初期欠陥が左記許容欠陥以下か	
社会・環境との調和に係わる性能	景観	景観に対する配慮	構造形式、塗装系等の選定	
	美観	美観に対する配慮	無塗装橋梁：錆汁対策 塗装橋梁：光沢の有無	
	騒音	騒音に対する配慮	発生音圧レベル	騒音対策の有無
	振動	振動に対する配慮	発生振動レベル	振動対策の有無

以下に、鋼橋の要求性能および目標性能について具体的に述べる。

(1) 橋の構造に関して用途あるいは機能に係わる性能

橋は、支間、桁下空間等種々の構造上の制約が課せられる。橋の構造は、これらの基本的な要件を満たすように設計、施工されなければならない。したがって、支間、桁下空間等の建築限界などの基本的な要件を明確にすることが橋の構造に係わる目標性能になる。すなわち、設計、施工は、その基本的な要件を満たすように行われる。

(2) 使用性に係わる性能

正常な使用ができなくなることはないように、過度の変形、変位、振動等が生じない部材および構造でなければならない。これに対する目標性能として、使用限界状態が設定される。使用限界状態とは、構造物または部材が過度の変位、変形、振動、過度のひび割れ等を起こし、正常な使用ができなくなったりする状態をいい、たわみ制限、変位制限等が設定される。

(3) 安全性に係わる性能

(a) 荷重作用に対する安全性

橋は、予め設定された重量の自動車等、通常作用する外力(荷重)、あるいは風等の偶発的な外力(荷重)に対して座屈、疲労等の破壊や転倒等を起こさず安全に車両を通行させることのできる構造でな

なければならない。これに対する目標性能として、終局限界状態が設定される。終局限界状態とは、構造物または荷重が破壊したり、大変形、大変位等を起こし、機能や安定を失う状態をいい、鋼橋では以下のような終局限界状態が考えられる。

- ・軸方向力，曲げモーメント，せん断力を受ける部材の降伏
- ・板要素の座屈
- ・連結部のすべり等
- ・橋桁の転倒，浮き上がり
- ・支承部の耐荷力，地震時の変位（走行安全性）
- ・・・

(b)耐震性能

荷重作用のうち地震については、再現確率が構造物の設計耐用年数をはるかに超えるような大規模地震動を考慮する場合には、安全性に対する考え方が、通常の荷重と異なってくる。そこで、耐震に係わる要求性能を別途考慮することにする。

耐震に係わる要求性能は、中小規模（L1地震動）の地震動に対しては補修が必要になるような損傷が発生しないこと、および大規模地震動（L2地震動）に対しては崩壊しないことが基本になる（土木学会第二次提言）。

これに対する目標性能として、例えば、表2に示す構造系あるいは部材の損傷程度をもとにした耐震性能を設定することができる⁴⁾。なお、このような耐震性能を設定するとき重要なことは、構造物全体系に着目すべきことである。

表2 耐震性能の例

	耐震性能のレベル	想定地震動
耐震性能Ⅰ	地震後にも補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じさせない。	L1地震動
耐震性能Ⅱ	地震後に補修を必要とするが、早期に機能が回復できる。	L2地震動
耐震性能Ⅲ	地震によって構造物全体系が破壊しない。	L2地震動

(4) 耐久性に係わる性能

橋は、想定される荷重・環境作用の基で設計耐用年数中継続して必要なレベルの性能が確保されなければならない。耐久性に係わる性能は、耐用年数中のパフォーマンスとして設定される。すなわち、性能を低下させる要因は損傷、材料劣化等であり、荷重・環境作用の基で設計耐用年数、それらの発生・程度をコントロールすることが求められる。ただし、一般には、適切な維持管理を行うことが必要であり、対象橋梁に対してどのような維持管理（検査、診断、監視、補修等）を行うかを設計時に明示することが重要である。

(a) 設計耐用年数の設定

耐久性に係わる性能を設定する場合、全ての構成要素（部材）に対して最初に設計耐用年数を想定する必要がある。ここで、設計耐用年数は、「その間、維持管理計画で定めた範囲の維持管理ですむことを保証できる期間」の意味に用いる。なお、設計耐用年数に対して、寿命は「構造物が取りかえられる時期、あるいは架設されてから取替えられるまでの期間」の意味に用いられる⁵⁾。すなわち、設計耐用年数と寿命とは区分して用いるべきであり、設計耐用年数を、それを超えると橋梁として物理的に利用できなくなるという意味に用いるべきではないと考えている。設計耐用年数としては、これまで設定されている各構造物の設計耐用年数等を考慮すると、当面下記のように設定することが考えられる³⁾。

- ・通常の鋼構造物 : 100年

- ・仮設物 : 数年程度
- ・交換可能な部材 : 20～30年程度

(b) 鋼橋の耐久性に係わる性能

鋼橋では、鋼材の材質劣化を考慮する必要はない。これまでの種々の損傷および取替えの事例から、鋼橋において耐久性に影響を及ぼし特に考慮すべきは腐食(断面性能に影響を及ぼすような断面欠損)および疲労の問題と考えられる。ただし、塗装の塗膜あるいは床版のようなコンクリート部材では材料劣化を考慮する必要があり、鋼部材とは別途の扱いが必要になる。

耐久性に係わる目標性能は、初期の性能をどの程度保つかといった観点から、いくつかのレベルを設定すればよいと考えられる。

① 防錆・防食に対する耐久性能

腐食に対しては、鋼橋には、無塗装橋梁および塗装橋梁がある。腐食に対する耐久性能として、例えば表3のような腐食耐久性レベルが、また塗装に対する耐久性能として表4のような耐久性能レベルが考えられる。

表3 腐食に対する耐久性能の例

	腐食耐久性レベルⅠ	腐食耐久性レベルⅡ	腐食耐久性レベルⅢ
耐久性能	耐用年数中、供用開始時の状態を維持する。	耐用年数中の腐食による断面減少を許容する。ただし、耐用年数中の部材の取替え、補強は行わない。	耐用年数中の腐食による断面減少を許容する。また補修・補強、耐用年数中の部材取替え(2次部材、1回程度)を許容する。
照査指標	腐食減量，耐荷力		
維持管理のレベル	・点検	・定期的な点検 ・必要に応じて補修塗装(塗装橋梁)	・定期的な点検 ・詳細な調査(腐食が進行した場合) ・必要に応じて補修・補強
備考	○無塗装橋梁： 高耐候性鋼の利用 表面処理、・・・ ○塗装橋梁： 定期的な塗替え (重防食塗装，メッキ)	○無塗装橋梁： 部分塗装、・・・ ○塗装橋梁： 塗膜の状況に応じた塗り替え	○塗装橋梁：塗膜の状況に応じた塗り替え

表4 塗装に対する耐久性能の例

	耐久性レベルⅠ	耐久性レベルⅡ	耐久性レベルⅢ
耐久性能	退色等により美観を損なわない。	錆の発生を許容しない。	錆の発生を許容する。
照査指標	色調，塗膜劣化度		
維持管理のレベル	・点検 ・定期的な塗り替え	・定期的な点検 ・必要に応じて補修塗装，あるいは塗り替え	・定期的な点検 ・塗膜の状況に応じた塗り替え

② 疲労に対する耐久性能

疲労に対する耐久性能レベルとして、例えば表5のような疲労耐久性レベルが考えられる。

表5 疲労に対する耐久性能レベルの例

	疲労耐久性レベルⅠ	疲労耐久性レベルⅡ	疲労耐久性レベルⅢ
耐久性能のレベル	供用開始時の状態を維持する（き裂の発生を許容しない）。	少なくとも主要部材にはき裂を発生させない。必要に応じて補修（耐用年数中に1回程度）。	き裂は、維持管理によって対処する
照査指標	疲労損傷度		疲労照査を行わない。
維持管理のレベル	・点検	・定期的な点検 ・必要に応じて補修・補強	・定期的な点検 ・補修・補強
備考	・詳細な構造解析	・設計に通常用いる構造解析レベル	・取り替え暫定の部材、仮設物等に適用

(5) 維持管理に係わる性能

どんな構造物に対しても常に適切な維持管理を行うことは必要不可欠である。これまでは、設計と維持管理は別のもので扱われていたが、新しい体系では、維持管理を組み込んだものにすべきである。すなわち、維持管理に係わる性能では、将来何等かの維持管理が行われることを前提に設計されることを基本にし、検査方法、検査周期等、補修・補強等の具体的な維持管理のレベルを目標性能として設定する。例えば、下記のような内容が考えられる。

- ・検査方法 : (例) 目視等
- ・検査周期等 : (例) 1回/2年（鉄道橋の例）
- ・補修・補強のレベル : (例) 腐食一部分塗装 1回/耐用年数, . . .
き裂-あて板補強 1回/耐用年数, . . .

(6) 施工時の初期品質に係わる性能

鋼橋は、安全性や耐久性が製作精度や初期欠陥等施工に伴う初期品質によって左右される場合がある。したがって、安全性、耐久性の前提条件となるレベルの初期品質が確保されなければならない。

初期品質に係わる目標性能は、以下のように製作・架設精度、溶接等品質等の項目ごとに設定すればよいと考えられる。なお、溶接等品質に関しては、例えば欠陥の有無等の確実な照査方法が現在の技術レベルでは確立されていないので、適切な品質管理の実施を前提にすべきだと考えている。

- ① 製作・架設精度
- ② 鋼材加工の品質
- ③ 溶接等品質
 - ・溶接部における初期欠陥の種類と大きさ
 - ・品質管理体制
 - ・溶接工
 - ・厚板の溶接、高強度鋼の溶接
 - ・溶接作業
 - ・ . . .

(7) 社会・環境との調和に係わる性能

(a) 環境（騒音・振動）に係わる性能

橋は、車両の通過に伴う騒音・振動等の環境問題に十分配慮された構造でなければならない。また、十分に周辺の環境に配慮して施工が行われなければならない。その目標性能としては、以下のようなものが考えられる。

- ・環境に配慮した構造にすること。

・照査指標：騒音・振動値（音圧・振動レベル）

(b) 美観・景観に係わる性能

都市内に建設される橋等，人々の生活に密着した橋では，美観・景観に配慮することが求められることが多い。この場合，美観・景観に配慮した設計を行うことを目標性能にすることが考えられる。また，照査指標としては，塗装仕様の場合，色の変調，色むら，色あせ，白亜化などが，また無塗装仕様の場合，さび汁対策の有無などが考えられる。

4. 検証方法

性能照査型設計法における照査の基本は，以下に示すように，設計耐用年数における構造・部材の挙動（応答値）を当該期間で想定される荷重・環境作用の下で定量的に表現し，それが主に限界状態として設定される目標性能を満たすかどうかを確認することである。

$$\text{基本的な性能評価手法} : \text{応答値} \leq \text{限界値}$$

設計段階で既に性能試験・事前検査等により目標性能を満たすかどうか判定できる事項については，事前試験・検査をもって照査に替えることになる。また，2. 3⑤に述べたように，現在の技術レベル，設計を取り巻く環境を考慮すると，例えば構造細目に定められるディテールを採用すれば疲労等の影響を考慮しなくてよいといった，所定の方法に従うことで確実に性能が満足される場合には照査を省くことになる。このような照査にあたり，方法の信頼性と適用性（材料，施工，解析，荷重環境作用の不確実性）ならびに検査方法の精度に応じて，性能の照査や検査の結果に幾らかの安全余裕度を見込むことになる。

なお，設計耐用期間中の性能を検証する耐久性能の照査に関しては，現在の技術レベルでは製作時から供用終了までの時間軸で，経時的な性能の変化を完全に把握し，安全・使用・耐震性能を照査することは難しい。しかし，鋼構造の場合には，前述したように腐食および疲労を中心に照査すればよいと考えられるので，比較的精度よく予測可能と考えられる。疲労については，最近の疲労設計法の進歩によりその精度は大幅に向上した。腐食については，解析的に予測することは難しいが，既設の鋼構造物を調査（環境，塗装経歴，部材・部位別腐食量，・・・）しデータを収集すれば，その結果を利用して腐食の進行の程度を予測することは可能と考えられる。ただし，疲労に関しては，構造物に実際に発生する応力度をより精度よく予測する手法等の研究が必要であり，また腐食に関しては，腐食が局部的故に構造物全体の耐荷力に及ぼす影響を明確にする等の研究が必要である。

5. 米国の道路構造物に対する新しい契約方式

前述したように，性能を基盤にした設計体系では，設計基準のみならず検査や維持管理の体制，あるいは契約方式等も含めて新しいシステムを構築していくことが必要であり，そのための勉強も重要である。ここでは，その一つの例として，米国で行われている Warranty Project を紹介する¹⁾。

米国各州の道路局（State Highway Agency）では，最近，道路関連の工事に Warranty Project が増えつつある。Warranty Project は，その契約方式に特徴がある。すなわち，これまでの方式では，請負人は，与えられた計画とスペックにしたがって工事を行い，検査に合格すれば工事完了後にはその性能に対して責任を負わない。各道路局は，工事がスペックに従って行われているかを確認するために，工事期間中常に検査員が検査を行う。それに対して，Warranty による契約方式では，請負人は明示された完成後の性能を満足すれば，材料や工法を自由に選定して工事を行うことが可能になる。ただし，工事終了後のある期間の品質に対して責任を負うことになり，損傷等が発生すれば請負人はその責任で直さなければならない。発注者は，この方式により完成後の品質と完成後ある期間保証を受けることが可能になる。この保証の期間は，これまでの事例（塗装および道路舗装）では1~4年程度である。

Warranty Project は、米国各州の道路局 (State Highway Agency) が、時間と資金を節約し、品質を改善し、イノベーションを推進するために行うようになったもので、1987年に北カロライナ州の交通局で、道路舗装に対して行われたのが最初である。図2は、プロジェクトの推移を示したものであるが、1996年から急増している。この方式がどの程度のコスト減に繋がっているか、発注者側と受注者側にどの程度のメリットがあるか等は、具体的に明確にされていないが、少なくとも州当局にとって検査員を省略できることは大きなメリットのようである。また、図3は、その内訳を示したものであるが、橋梁の塗装および舗装に関連するものが多くを占めている。これは、これらの耐用年数が短く、比較的实施が容易なためであろう。耐用年数の長い橋梁本体にこのような方式を導入するには解決すべき問題点が多々あると考えられるが、性能を基盤にした設計体系を構築していくためには、いずれこのような方法論の議論が必要と考えられる。

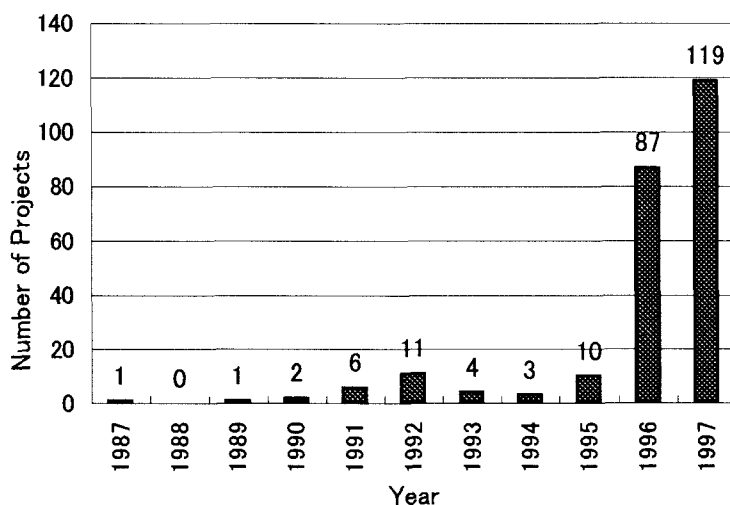


図2 Warranty Project の推移⁶⁾

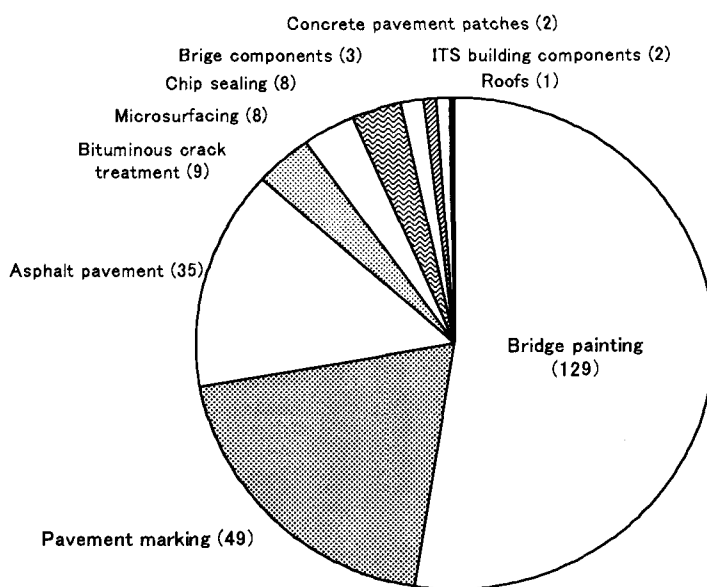


図3 Warranty Project の種類⁶⁾

6. おわりに

我が国も、近い将来、性能を基盤にした設計体系に移行していくものと考えられるが、そのための個々の技術課題を解決していくことはもちろん、そのコンセプトを明確にすることが重要である。また、設計基準のみならず検査や維持管理の体制、あるいは契約方式等も含めて新しいシステムを構築していくことが重要である。場合によっては現在の社会の仕組みを変えていく必要がある。未だ課題は山積しており、今後十分な議論および研究を進めて行く必要がある。

参考文献

- 1) 藤谷秀雄：性能を基盤とした新構造設計体系—建築における構想—，J S C E，Vol.83，1998.1
- 2) 堺孝司：性能照査型設計法のゆくえ，橋梁と基礎，1997.8
- 3) 土木学会コンクリート委員会資料，<http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/mem/maekawa/jsce-code>
- 4) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）（案），1998.10
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造物の寿命に関する調査研究報告書，JSSC Vol.5，No.39
- 6) Jeffrey S. Russell, Awad S. Hanna, Stuart D. Anderson, Patrick W. Wiseley, and Robert J. Smith : The WARRANTY ALTERNATIVE, CIVIL ENGINEERING, 1999.5