劣化予測の観点からみた 我が国の道路橋の規格・規準類の変遷

玉越 隆史¹・横井 芳輝²・石尾 真理³・鎌田 敏郎⁴

¹正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所橋梁研究室 (〒305-0032 茨城県つくば市旭 1 番地)
E-mail: tamakoshi-t92gd@nilim.go.jp

²正会員 元国土交通省国土技術政策総合研究所橋梁研究室
(本州四国連絡高速道路(株)鳴門管理センター) (〒722-0053 徳島県鳴門市土佐泊浦字大毛 18)
E-mail: yoshiteru-yokoi@jb-honshi.co.jp

³正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所企画課 (〒305-0032 茨城県つくば市旭 1 番地)
E-mail: ishio-m92g8@nilim.go.jp

⁴正会員 大阪大学教授 工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
E-mail: kamada@civil.eng.osaka-u.ac.jp

全国の多数の道路橋で高齢化が進んでおり、限られた予算で合理的に維持管理することが求められている。そのため、点検データから劣化特性を推定して将来予測に反映する試みも行われている。道路橋では古くから技術基準類が整備され、年代毎には全国でほぼ同じ基準で建設されてきており、その性能は整備時点の技術基準に大きく依存する。本論文では、適用されてきた技術基準の規定を主に耐久性との関係に着目して整理した。その結果、主な劣化要因に関わる規定は、経験的な構造細目等の仕様や下限値規定であり、潜在的に耐久性能の大きなばらつきが避けがたいことを明らかにした。一方で、性能規定化以前の道路橋では、耐久性能に関わる仕様等が適用基準毎に一致するものも多く、劣化予測の観点から耐久性能の差別化が行える可能性があることを示した。

Key Words : highway bridge, history of design specification, durability, design service life

1. はじめに

道路橋の場合、一旦、国土の物流経路の一部として道路網に組み込まれると、通常、無期限に供用性を維持するための様々な維持管理行為が行われることが避けられない。加えて、主たる構造が鋼材料とコンクリート材料のみで構成される特徴から、材料の物性や品質水準が明確かつある程度保証されており、適切な維持管理が行われる限り、材料の経年劣化などで物理的寿命を迎えることは考えにくい。

これまで国で行った全国の道路管理者に対する架け替え実態の調査^{1)~4)}でも、架け替え理由の大半は、機能的陳腐化などである。架け替え実態調査の結果の例を図-1に示す⁴⁾。機能上の問題や(道路)改良工事、基準の改定に伴う耐震対策や耐荷力不足など、当該橋梁に求められる性能の引き上げが架け替え理由の大半を占める。上下部工の損傷が理由とされているものも一定数が報告されているものの、単純に材料の劣化や損傷が深刻化し

て補修補強が物理的に不可能となったもの以外に、高齢橋では、経済的合理性などから補修や補強よりも更新が有利と判断されたものも多いと考えられる。

なお、時代の要請などによって、道路網やその機能の一部を担う道路橋に対する機能的な要求や地震等の外力に対する構造物の状態等の要求性能が変化することは今

図-1 道路橋の架け替え理由⁴⁾

後もある程度生じると想定される。これらの変化に対する機能向上や更新等は人為的であり、将来の維持管理計画の検討においては、劣化予測などの推計で評価する物理的寿命とは別に考えるべきものである。

一方、膨大な数に上る我が国の道路橋資産は着実に高齢化しつつあり⁹⁾、経年劣化に伴う変状の発生や進展が、性能の低下や構造安全性に与える影響に対する懸念が今後は急速に増えていくことが予想される。限られた予算や人的資源の下で、これらの道路橋資産の健全性を、将来にわたって適切な水準に維持し、道路ネットワークの機能を維持していくためには、無理なく確実に道路橋の適切な管理が行われ続けることが重要である。そのため、近年、予防保全などの計画的維持管理の実現に向けて、道路橋の将来の状態を点検結果から求めた劣化予測式で推計しようとする試みが盛んに行われてきている⁹⁾。しかし、均質な点検データの蓄積は十分ではなく、全国規模の実績データに基づく劣化の特徴の解明のための取り組みも、筆者らが国管理の道路橋の定期点検結果で統計分析を行った例^{7)~9)}以外にはみあたらず、信頼性の高い将来状態の予測の実現性に関しては不明な点が多い。

一方、道路橋の場合、社会資本として古くから技術基準類が整備されており、架設年代毎には全国でほぼ例外なく同じ技術基準に基づいた設計・施工が行われており、既設の道路橋の性能は整備時点で適用されていた技術基準に大きく依存するという特徴を有している。

過去には、このような道路橋の特徴を踏まえて技術基準の変遷とそれらが適用された道路橋の性能の関連性に着目して、耐震性能と地震被害実績との関係や、床版における疲労耐久性や耐荷力性能向上効果との関係を考察した研究^{10)~14)}が行われているものの、劣化予測の観点から技術基準における規定内容との関係性について考察した研究成果は見当たらない。

以上を踏まえ、本論文では、これまで我が国で適用されてきた道路橋の設計技術基準について、主に耐久性に関連する規定内容とその変遷を整理し、これまで整備されてきた既設道路橋の性能の実態に基づく将来状態の予測の実現可能性について考察する。また、将来予測に基づく計画的管理の実現性の観点から、今後の規格・規準等の改定における課題について明らかにすることを試みる。なお道路橋は、過去から主に行政により整備されてきたことから、設計には法律や政省令以外に、具体的な安全率や許容値などを示した関係省庁の通達等の技術基準類が適用されてきた¹⁵⁾。このような基準の運用は、社会資本として、全国の道路ネットワークの性能の最低限を一定の水準に担保し、かつ調和したものとするためには大きな役割を果たしてきたと考えられる。

本論文では、耐久性に関する性能水準に着目して道路橋の整備に用いられてきた規定や規準類の内容を評価す

るため、法律や政省令に限らず、全国的に適用されてきた、耐久性能の具体的な達成水準を決定づける通達等も対象とする。

2. 道路橋の設計基準の変遷

道路橋に直接関係のある技術基準のうち最も古いものは、1886(明治19)年に内務省訓令第13号として制定された「道路築造保存方法」である¹⁶⁾。ここでは、国道の新設、改築を行う場合の路面構造、横断形状、排水、縦断勾配など、現在の道路構造令に規定されるような道路構造全般の規定が中心である。橋梁の具体的な性能に関するものとしては、設計荷重として455kgf/m²の等分布荷重のみが示されている。その後、1919(大正8)年に道路法の制定に併せて「道路構造令」¹⁷⁾が内務省令として公布されたものの、活荷重と有効幅員以外に道路橋の設計手法や性能について特筆すべき規定はない。そして、1926(大正15)年に道路構造令の趣旨に沿う細則としてとりまとめられた「道路構造に関する細則」¹⁸⁾において、初めて活荷重以外の荷重や構造に対する基本的な要求性能である安全率に関して許容応力度が規定された。その後は、1970年代までの間、鋼橋やコンクリート橋あるいは下部構造など、材料や構造種類別に具体的な橋梁構造の設計基準がとりまとめられ、それぞれ通達等によって実務での適用がなされた。しかし、それぞれの基準が別々にとりまとめられたこともあり、例えば、道路橋に共通する性能の要求水準の有無やそれらについて何らかの統一的な認識の有無などについては、同時に適用されていた各材料や構造種別毎の基準からは明確には読み取れない。

そして、1973(昭和48)年頃からは、道路橋の設計施工の技術基準として材料や構造の別によらず統一的な基準体系として整理が行われ、1980(昭和55)年に現在と同じ共通編、鋼橋編、コンクリート橋編、下部構造編、耐震設計編の5編からなる一本化した技術基準体系となった¹⁹⁾。なお、当時から現在に至るまで、具体的な安全率や設計の前提となる施工品質への要求などについては、技術基準の位置づけとしては政省令ではなく、国土交通省(1980(昭和55)年当時は建設省)の局長通達(「橋・高架等の道路の技術基準」)として公告されてきた。また、通達本文に対して、実務の便や適切な運用を支援するために解説等を加えた図書が「道路橋示方書・同解説」という名称で図書として刊行されており、実務の設計・施工のほとんどで、これが用いられている。

現在までの道路橋の技術基準の主な変遷を表-1に示す。

表-1 主な道路橋の設計基準の変遷

橋の等級・活荷重	鋼橋	コンクリート橋	下部構造
1886 (M19) 道路築造保存方法			
1919 (T8) 道路構造令 街路構造令			
1926 (T15) 道路構造に関する細則	1926 (T15) 道路構造に関する細則	1926 (T15) 道路構造に関する細則	
		1931 (S6) 土木学会 鉄筋コンクリート標準示方書	
		1936 (S11) 土木学会 鉄筋コンクリート標準示方書	
1939 (S14) 鋼道路橋設計示方書案	1939 (S14) 鋼道路橋設計示方書案, 鋼道路橋製作示方書案		
	1940 (S15) 電弧熔接道路橋設計及製作示方書案	1940 (S15) 土木学会 鉄筋コンクリート標準示方書	
		1949 (S24) 土木学会 コンクリート標準示方書	
		1955 (S30) 土木学会 プレストレストコンクリート設計施工指針	
1956 (S31) 鋼道路橋設計示方書	1956 (S31) 鋼道路橋設計示方書, 鋼道路橋製作示方書	1956 (S31) 土木学会 コンクリート標準示方書	
	1957 (S32) 溶接鋼道路橋示方書案		
	1959 (S34) 鋼道路橋の合成桁設計施工指針		
		1961 (S36) 土木学会 プレストレストコンクリート設計施工指針	
1964 (S39) 鋼道路橋設計示方書	1964 (S39) 鋼道路橋設計示方書, 鋼道路橋製作示方書, 溶接鋼道路橋示方書	1964 (S39) 鉄筋コンクリート道路橋設計示方書	1964 (S39) 道路橋下部構造設計施工指針[くい基礎の設計編]
	1965 (S40) 鋼道路橋の合成ゲタ設計施工指針		
	1966 (S41) 鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針		1966 (S41) 道路橋下部構造設計指針[調査および設計一般編]
		1968 (S43) プレストレストコンクリート道路橋示方書	1968 (S43) 道路橋下部構造設計指針[橋台・橋脚の設計編], [直接基礎の設計編], [くい基礎の施工編]
			1970 (S45) 道路橋下部構造設計指針[ケーソン基礎の設計編]
1973 (S48) 道路橋示方書 I 共通編, 特定の路線にかかる橋, 高架の道路等の設計荷重	1973 (S48) 道路橋示方書 II 鋼橋編		1973 (S48) 道路橋下部構造設計指針[場所打ちぐいの設計施工編]
			1976 (S51) 道路橋下部構造設計指針[くい基礎の設計編]
		1978 (S53) 道路橋示方書 III コンクリート橋編	
1980 (S55) 道路橋示方書 I 共通編	1980 (S55) 道路橋示方書 II 鋼橋編		1980 (S55) 道路橋示方書 IV 下部構造編
		1984 (S59) 道路橋塩害対策指針 (案)	1984 (S59) 鋼管矢板基礎設計指針
1990 (H2) 道路橋示方書 I 共通編	1990 (H2) 道路橋示方書 II 鋼橋編	1990 (H2) 道路橋示方書 III コンクリート橋編	1990 (H2) 道路橋示方書 IV 下部構造編
			1991 (H3) 地中連続壁基礎設計施工指針
		1992 (H4) プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリート T げた道路橋設計施工指針	
1994 (H6) 道路橋示方書 I 共通編	1994 (H6) 道路橋示方書 II 鋼橋編	1994 (H6) 道路橋示方書 III コンクリート橋編	1994 (H6) 道路橋示方書 IV 下部構造編
1996 (H8) 道路橋示方書 I 共通編	1996 (H8) 道路橋示方書 II 鋼橋編	1996 (H8) 道路橋示方書 III コンクリート橋編	1996 (H8) 道路橋示方書 IV 下部構造編
2002 (H14) 道路橋示方書 I 共通編	2002 (H14) 道路橋示方書 II 鋼橋編, 鋼道路橋の疲労設計指針	2002 (H14) 道路橋示方書 III コンクリート橋編	2002 (H14) 道路橋示方書 IV 下部構造編
2012 (H24) 道路橋示方書 I 共通編	2012 (H24) 道路橋示方書 II 鋼橋編	2012 (H24) 道路橋示方書 III コンクリート橋編	2012 (H24) 道路橋示方書 IV 下部構造編

表は、道路橋の建設に広く反映された可能性が高いかどうかという観点で抽出・整理しており、国の設計基準以外にも、国の設計基準での反映を待たず、耐久性との

関わりの観点で実務に実質的な変化を生じさせたと考えられる土木学会等の学協会による技術基準類は筆者の判断で加えている。

なお、道路橋は多くの部材が複雑に組み合わせられ、それらが一体となって機能することではじめて橋全体として求められる性能を発揮する。そのため設計では、橋全体の性能の前提として部材それぞれに求める性能が設定され、それが満足されるよう部材単位で照査することが基本となる。このため橋の性能に支配的な影響を及ぼす部材の耐久性が橋全体としての耐久性を決定づけることとなる。そこで本研究では、鋼製とコンクリート製それぞれの部材の設計に用いられてきた耐久性に関する基準をレビューすることで、これまで我が国で建設されてきた道路橋の耐久性の特徴を明らかにすることを試みる。

なお、論拠として取り扱った過去の基準類の中には現在では一般に入手困難なものもあるため本論文では当該の条文や解説を適宜抜粋して掲載することとした。

3. 鋼部材の耐久性に関する規定の変遷

道路橋の設計基準として鋼部材および鋼橋についてまとめた形態として成立したのは、1939（昭和14）年にとりまとめられた「鋼道路橋設計示方書案」（以下「S14 鋼示」という。）²⁰からである。S14 鋼示では、適用の範囲、橋梁の等級区分の設定、荷重、許容応力度などが初めて定められており、その適用限界と要求性能が明確化された点で社会資本の整備に用いる近代的な技術基準としての基本的な要件が整った初めての技術基準とみることができる。

現在に至るまで鋼材料については、道路橋のような使用条件では材料的に腐食と疲労以外に経年的にその物理的特性が変化するなどによる劣化は生じないと考えられており²¹、S14 鋼示の中でも、耐久性に関係のある規定としては腐食と疲労に関係するもののみにについて言及されている。このことは見方を変えたと昭和初期の近代的な設計基準類確立の黎明期より腐食や疲労によって道路橋の鋼部材が劣化しうとの認識があり、後述する規定とその解説に示すように基準の検討にあたっても劣化への対策について議論がなされ、必要な対応が図られてきたものと考えられることができる。

(1) 腐食に関する規定の変遷

S14 鋼示では、鋼材の腐食に対して二つの規定がある。一つは設計細目として第40条に鋼材の防食手法として塗装、排水、清掃に容易な構造とすることが規定されており、その解説には、別途適切な維持管理が行われることが不可欠である旨が示されている²²（図-2）。

もう一つは、第45条では鋼材厚さの最小値が規定²³されている。その理由の一つに、不適切な維持管理の可能性を考慮したことによる腐食への対策であることが解

第7章 設計細目

第40条

構造ノ各部ハナルヘク単純ニシテ製作、運搬、架設、検査、塗工、排水、掃除等ニ便ナル設計ト為スヘシ。

・・・略・・・

〔解説〕

・・・略・・・

耐久的な鋼構造物等は何等維持は要せぬものといふ考を以てのぞむならば大変な心得違である。ペイントの剥落、塵芥と共に滞水を生ずること等いづれも鋼構造物の寿命を減少するものであることはよく心得て置かなくてはならない。・・・略・・・

第45条 鋼材ノ厚

鋼材ノ厚ハ8mm以上トシ工形鋼、溝形鋼ノ腹部ノ厚ハ7.5mm以上トス。但シ・・・略・・・

〔解説〕

使用すべき鋼材はその維持が悪い為の腐食を考慮しまたは製作、加工に際しての必要上から鋼材の最小の厚を規定する必要がある。・・・略・・・

※「鋼道路橋設計示方書案解説 1939（昭和14）年」²⁰より抜粋し、漢字等は一部改めた。

図-2 S14 鋼示における耐久性に関する記述

説に示されている（図-2）。その後、最小鋼材厚さの規定は、現在²⁴に至るまで類似の規定が道路橋示方書で踏襲されてきているものの、設計供用期間などの時間的概念との関わりについては一貫して明確には説明されてきていない。このことから、最小鋼材厚さの値そのものは、適切な維持管理ができなかった場合の腐食代を意識したものとなっており、ある程度の腐食による減厚は許容できる値となっているものの、具体的な時間的目標や根拠と関連づけられるものとは考えにくい。以上から、通常行える範囲の適切な維持管理が行われることで、腐食によって耐荷力設計で要求される鋼材の断面性能などには有害な影響は半永久的に生じないとの考えも背景にあったものと推測できる。S14 鋼示の改定として出された「鋼道路橋設計示方書 1956（昭和31）年」（以下「S31 鋼示」という。）²⁵では、「腐食防止」（第73条）²⁶という規定が設けられた。ここでも、確実な導排水のための排水管の最小直径が新たに規定されたものの、設計供用期間の概念や腐食対策の基本的な思想は明示されていない。このように、鋼道路橋の設計においては、適切な維持管理の中で清掃や導排水システムの維持を行うとともに、必要に応じて防食システムを更新することが前提となっており、これらを行わずに腐食によって物理的な寿命に至らしめることは想定していないと推測される。また腐食による劣化を定量的に見積もることの困難さから、経験に基づいて板厚などの具体の制限を課す方が所要の性能が確実に得られると考えられていたことも事実²⁷である。

2002（平成14）年になって、道路橋示方書は性能規定化と耐久性の向上を大きな目的に掲げて全編が大幅に改

定され「道路橋示方書・同解説 2002(平成14)年」(以下「H14道示」という。) ²⁸⁾がとりまとめられた。

H14道示は高齢化橋梁の増加に伴って既設橋に様々な劣化や損傷がみられるようになってきたことも踏まえて、個々の橋のライフサイクルコストの縮減によって将来の維持管理負担の軽減に寄与することを目標の一つとして検討が行われた ²⁹⁾。

その結果、設計荷重条件について生起確率などの信頼性との関わりを明示しない許容応力度設計体系を踏襲する一方で、設計で目標とした耐久性が達成されることの信頼性を確保するためには、設計上の目標期間をある程度具体的に念頭において耐久性の照査が行われる必要があるとの認識から、設計上の目標期間の標準を100年 ³⁰⁾として耐久性に係る規定の見直しが行われている(図-3)。

H14道示の検討にあたっては、鋼部材の耐久性についても、それまでの示方書における各規定が、具体的に100年間の供用状態を考えた場合に、それを満足するとみなせる安全余裕を有するかどうかといった観点で改めて精査が行われ、腐食に対しても、適切な方法で防せい防食を施すことが条文に明記された ³¹⁾。

ただし、ここでも定量的な照査方法や評価基準については、統一的に定めるだけの知見がないことを踏まえて、道路橋示方書には具体的な内容は規定せず、適切な方法で行うことのみを要求したものとなっている。そして、具体的な防食手法は、基準を補完するものとしてとりまとめられた技術参考書である「鋼道路橋塗装・防食便覧」(以下「塗装・防食便覧」という。) ³²⁾において従来より実績の多い代表的な防食方法について、推奨される標準仕様等が示された ³³⁾。これらは、水中部や地中部に位置するなど、定期的な点検や塗装などの防食システムの補修や更新が困難な下部構造についても同様である。

そのため、下部構造に用いられる鋼管杭などの一部で、維持管理の不手際による腐食の発生に対する構造細目的な配慮や、防食システムの施工・維持が困難な部位に対する腐食減厚余裕(腐食代)の確保が行われる以外は、腐食に対する耐久性を本体部材そのもので考慮する措置は規定上求められていない。

第1章 総則

1.5 設計の基本理念

〔解説〕

・・・略・・・

ただし、今回新たに規定した耐久性に関する事項については、時間の概念が必要であることから、一定の知見が得られているものについては100年を目安に設定した。

・・・略・・・

※「道路橋示方書・同解説 I 共通編 2002(平成14)年」²⁸⁾より抜粋。

図-3 H14道示における耐久性の目標期間の記述

耐久性の程度やその信頼性を、期待する設計上の目標期間と連動して定量的に制御するのであれば、例えば腐食代について、構造本体の有効断面が守られるための定量的な要求が環境条件などに応じて設定される必要がある。しかし、例えば、下部構造に用いる鋼製の杭に対しては、道路橋に対する設計に特化して初めて指針としてとりまとめられた「道路橋下部構造設計指針 杭基礎の設計編, 1964(昭和39)年」(以下「S39下部指針」という。) ³⁴⁾において腐食減厚の標準を2mmと明記 ³⁵⁾されているものの、この規定は「道路橋示方書・同解説 1996年(平成8年)」(以下「H8道示」という。) ³⁶⁾まで見直されていない。そして、H8道示の下部構造編で、腐食調査事例の蓄積結果を基に、この値は1mmに減じられている ³⁷⁾。その一方で、初めて100年という耐久性に関する設計上の目標期間を想定して全編の見直しが行われたH14道示においてもH8道示の規定は踏襲され、標準の腐食減厚は1mmでよい ³⁸⁾とされており、定量的な耐久性との関係には必ずしも信頼性の面で十分な根拠があるとは考えにくい。図-4にS39下部指針の記述を示す。

以上のように、腐食に関する規定の変遷からは、腐食に対しては補修を繰り返すなどの保守可能なものは適切な維持管理を前提に設計上の目標期間中は耐久性が確保されたとの立場がとられているものの、その品質の定量的な制御は行われておらず、これは保守困難で腐食代が確保される場合についても環境条件等との関連は明確で

第6章 構造細目

6.4 鋼ぐい

・・・略・・・

(2) 鋼ぐいの各部の厚さは、強度計算上必要な厚さ(最小6mm以上とする)に腐食による減厚を加えたものとする。

腐食による減厚が大きい場合には適当な防食を施さなければならない。

施工時にくいのある各種応力に対しては全断面を有効とする。

(3) 腐食減厚はくいが土または水に接する部分について考慮し、鋼管ぐい内面については考慮しなくてもよい。

：

〔解説〕

・・・略・・・

(2) 鋼ぐいの各部板厚は、圧縮、引張り、曲げ、せん断など、設計上くいのその部分に生ずるすべての応力に対し安全な厚さに予想される腐食減厚を加えた値以上とする。

：

(b) 海水または鋼の腐食を促進する工業排水などの影響を受けない場合、腐食調査を行わず防食処理も施さないときは常時水中および土中にある部分(地下水中有る部分を含む)に対して2mmの腐食減厚を考える。

・・・略・・・

※「道路橋下部構造設計指針 くい基礎の設計篇 1964(昭和39)年」³⁴⁾より抜粋。

図-4 S39下部指針における腐食に関する記述の例

図-5 鋼橋の腐食の状態確率分布の例

なく、いずれも信頼性を定量的に制御したものとはなっていないことは明らかである。

図-5 は著者らが全国の国管理の道路橋の定期点検結果を用いて鋼橋主桁の腐食に着目して状態確率分布を求めた結果の例⁹⁾である。これは、同じ部材の同じ位置(同一要素)に対して、概ね5年間隔で得られている2回の点検の間の状態遷移の実績データを単純に数え上げて算出したマルコフ遷移確率を用いて、経年的な損傷程度の評価の推移を予測した結果である。なお、詳細な内容等は文献8)による。この図の縦軸は、点検で評価を行う5段階の状態評価である損傷程度の評価の割合を示している。塗装系や部材位置が同一条件となるよう母集団を分けても、経過年0年時点でa(健全)であったものが、経年に従い各劣化段階(b~e)に移行する過程には極めて大きなばらつきがあることがわかる。このように、実際の点検記録から得られる劣化の特徴の分析結果からも実態として劣化には大きなばらつきを有することがわかる。

(2) 耐候性鋼材に関する規定の変遷

道路橋では、あらかじめ構造部材に用いる鋼材の腐食を考慮する耐候性鋼材がライフサイクルコスト低減への期待から多く採用されるようになってきている。

耐候性鋼材は、鋼材表面に緻密なさび層が形成されることにより、腐食速度が低下することで特別な防食システムの施工や更新を要しない鋼材であり、我が国では1960年代半ばから道路橋への採用が始まった³⁹⁾。道路橋の設計基準としては「道路橋示方書・同解説 1973年(昭和48年)」(以下「S48道示」という。)⁴⁰⁾にて初めて、使用材料としてSMA41, SMA50, SMA58の三種が規定された。採用開始当初のJIS G3114:1983では、無塗装で用いる裸仕様(W仕様)に加えて、塗装仕様(P仕様)の鋼材も規定されており、道路橋においても塗装寿命が延ばせることで耐久性の向上に資するとの理解から塗装仕様の鋼材も使用されていた。その後、経済的合理性の観点から裸仕様が一般的となってきたため、「道路橋示方書・同解説 1990年(平成2年)」(以下「H2道示」という。)⁴¹⁾からは裸仕様のみが規定⁴²⁾されている。

耐候性鋼材の場合、防食システムは母材の表層が腐食して形成される緻密なさび層による。腐食速度は徐々に

低下するものの完全に腐食進行が停止するわけではない。このため、本来であれば腐食減厚の考慮の必要性について、設計上想定する期間の長さに関連して耐久性の信頼性の観点から検討されるべきものである。これについては、1980年代半ばから1990年代にかけて国が業界団体等と数次にわたって共同で行った全国の腐食実態と塩分環境に関する調査結果^{43)~46)}を踏まえて、架橋地点の塩分環境として「飛来塩分0.05mdd以下」であれば50年間の推定板厚減少量が0.3mmを超えず、腐食減厚を考えなくとも耐荷力に対する有害な影響はないとする、耐候性鋼材の採用可否を架橋地点の塩分環境で判断する考え方が示された⁴⁷⁾。

道路橋の設計では、鋼材の最小板厚の標準が8mmなので仮に部材の両側からこの推定板厚減少量分が平均的に完全に喪失した場合、板厚が7.5%減少し、断面の負担が1割近く増すこととなる。腐食速度は低下するとはいえ完全にゼロにはならないと考えられているため、このような理解では100年間の推定板厚減少量はさらに大きくなり、耐荷力への影響も50年間の想定よりさらに大きくなる計算となる。しかし、100年の耐久性を想定したH14道示³⁰⁾、「道路橋示方書・同解説 2012年(平成24年)」(以下「H24道示」という。)⁴⁸⁾のそれぞれの改定においても、規定を見直すことなく所要の耐久性は確保されるものと考えてよいと解説され、採用可能地域の閾値として「飛来塩分0.05mdd以下」が踏襲されている。これは、耐候性鋼材の推定板厚減少量についてはあくまで局所的な最大値を安全側に評価したものであり、現実には飛来塩分などの腐食因子の影響も部位毎に大きくばらつくなど、断面の板厚が全体的に減少する量とは考えていないためである。これらのことから、基準の前提となっている板厚減少量の推定そのものが、少なくとも実供用下の橋に対する寿命推定の観点からは定量的な耐久性評価法として高い信頼性があるものではないことは明らかである。

(3) 疲労に関する規定の変遷

疲労については、S14鋼示の第42条で、現在の道路橋示方書にも規定のあるたわみ制限が「曲げ剛さ」として規定されている(図-6)⁴⁹⁾。この解説には静力学では考慮できない振動を制限する目的であると明記されており、当時より鋼部材では条件によっては振動が問題となりうるとの認識があったことが窺える。しかし、S31鋼示で初めて規定された繰返し交番応力の影響(第35条)(図-7)⁵⁰⁾の条項において、一般の道路橋では繰返し応力が常時作用するとは思われないとの理由で、特に材料の疲労を考慮した設計は規定しないとされている。また、S31鋼示においてS14鋼示の「曲げ剛さ」に相当すると考えられる「タワミ」(第36条)⁵⁰⁾の規定とその解説におい

第7章 設計細目
第42条 曲ゲ剛サ

〔解説〕

・・・略・・・

曲げ剛さに於て劣る構造物はその撓が大となり走行車両に依って大なる振動を生じ静力学的計算には欠点なくともこの振動に依って構造物に危険を生じる懼がある。故に曲げ剛さの程度を撓に依って表し、・・・略・・・

※「鋼道路橋設計方書案解説 1939（昭和14）年」²⁰より抜粋し、漢字等は一部改めた。

図-6 S14 鋼示における曲げ剛さの規定

第5章 構造物の設計

第35条 繰返し交番応力の影響

特殊の橋以外は、交番応力の繰返しの影響を考慮しなくてもよい。

〔解説〕

・・・略・・・

特殊な橋、たとえば道路橋に高速鉄道を通すような場合には、列車の通過に際してある部材に連続的に引張・圧縮応力が交互に生ずるのであるが、このような特殊な橋以外の一般の道路橋では繰返し応力が常時作用するとは思われないので、特に材料の疲労を考慮した繰返し交番応力に対する規定を設けないことにした。

・・・略・・・

※「鋼道路橋設計方書案解説 1956（昭和31）年」²⁰より抜粋し、漢字等は一部改めた。

図-7 S31 鋼示における繰返し交番応力の影響の規定

て疲労との関わりには特に触れられていない。これらのことから、S14 鋼示以降のたわみの規定は、少なくとも直接的に一定水準以上の疲労耐久性を確保させることを意図して、定量的な根拠に基づいて設けられたものではないと考えられる。

道路橋の場合、鋼部材の疲労については、構造的特徴や発生応力の状況から溶接部が主たる対象となる。道路橋の溶接に関する規定が初めて体系的にとりまとめられたのは、1940（昭和15）年に内務省より提案された「電弧溶接鋼道路橋設計及製作方書案」（以下「S15 溶示」という。）⁵¹⁾である。これは第二次世界大戦前のものであり近代の溶接とは技術的にも材料的にも大きな相違がある。そのため、設計荷重や許容応力度などの鋼道路橋の設計基準の基本的な事項全般については、戦前のものから大幅に改定されたS31 鋼示を踏まえてS15 溶示を全面改定して出された1957（昭和32）年の「溶接鋼道路橋設計方書解説」（以下「S32 溶示」という。）⁵²⁾が現在の道路橋の溶接に関する規定につながる初めてのものと考えられる。図-8にS32 溶示における疲労耐久性に関連する記述を示す。

第20条 突合せ溶接

〔解説〕

・・・略・・・

突合せ溶接は疲労強度が比較的高いが、この特徴を生かすためには、断面の過不足や欠陥のない溶接を行うことが大切で、このため開先の形状・開先角度などの選定に十分注意をしなければならない。・・・略・・・

第32条 重ね継手

〔解説〕

・・・略・・・

このような重ね継手に前面すみ肉溶接のみを用い、側面すみ肉溶接を行わないのは、疲労強度が小さいのであまり好ましい設計ではない。・・・略・・・

第33条 T 継手

〔解説〕

・・・略・・・

T 継手に図-33・5のような方向の大きな外力が作用する場合にすみ肉溶接を用いることは継手の疲労強度上好ましくないので、なるべく避けて、突合せ溶接とするのがよい。・・・略・・・

第38条 引張フランジ

〔解説〕

・・・略・・・

引張力を受け、活荷重応力が死荷重応力に比べて著しく大きいフランジおよび交番応力を受けるフランジに横構のガセット・補剛材等を溶接すると、その箇所の母材の疲労強度が低下するから、このような溶接はなるべく避けるのがよい。・・・略・・・

第41条 プレートガーダーの継手

〔解説〕

・・・略・・・

すみ肉溶接は応力の伝達が突合せ溶接に比べてなめらかでなく、疲労に対する耐久性も劣っているので、フランジプレートや腹板相互の継手には突合せ溶接を用いるほうがよい。

・・・略・・・

※「溶接鋼道路橋設計方書解説 1957（昭和32）年」⁵²⁾より抜粋し、漢字等は一部改めた。

図-8 S32 溶示における疲労耐久性に関する記述の例

S32 溶示は、S31 鋼示を用いて設計される鋼道路橋にアーク溶接を行う場合の設計および製作を適用範囲⁵³⁾とするとされており、道路橋として満足すべき要求性能もこれに準じたものであったと考えられる。そのため、想定する荷重条件や耐久性に関する要求水準についても、S32 溶示の中で特段の例外規定が設定されていなければS31 鋼示と同じであると考えられる。そのような観点からは、S32 溶示においても、溶接構造とすることに対して、繰返し荷重の影響に対する疲労耐久性等の条文は規定されておらず、疲労耐久性についての認識はS31 鋼示と同じと考えることができる。例えば、溶接継手の構造細目等の規定に関連して、条文の意図が疲労強度をより優れたものとなるような配慮から定められてい

ることが解説として記述されている⁵⁴⁾など、条文に関連して疲労強度に関する補足説明がされている程度に過ぎない。

以上より、道路橋の設計において、S31 鋼示や S32 溶示の制定時点では、溶接継手は形式や品質が疲労耐久性を左右するとの認識のあったことは否定できないものの、具体的にそれらを耐久性の目標や要件として、基準を通して設計に反映させる必要性が認識されていたとは考えにくい。その後、鋼道路橋の溶接に関しては、「溶接鋼道路橋示方書解説 1964（昭和 39）年」（以下「S39 溶示」という。）⁵⁵⁾を経て、1973（昭和 48）年には、現在と同様にコンクリート橋や下部構造など順次道路橋全体の設計基準を体系的にとりまとめた「道路橋示方書・同解説」の中で規定されてきた。この間、溶接技術や検査技術の動向を踏まえて許容応力度の引き上げなどの見直しは行われてきているものの、2002（平成 14）年に鋼橋に部材の条件によらず等しく疲労設計が義務づけられるまでは、鋼床版などの一部の例外を除いて具体的な疲労耐久性の照査については具体的な規定は設けられていない。S39 溶示では、鋼床版の設計について初めて示され、デッキプレートの板厚の制限が規定⁵⁶⁾されている。しかし、この規定の意図は、あくまで舗装への悪影響を回避することを目的にたわみを抑制することとされており、少なくとも、規定上は鋼床版の疲労耐久性の確保を意図したものであるとまでは読み取れない。近年 U 型等の閉断面の縦リブを有する鋼床版に亀裂が数多く報告⁵⁷⁾されており、疲労現象と認識されている。しかし、S39 溶示では縦リブに極めて大きな応力が発生することに言及されているものの、それが局部的なものであるために鋼床版全体の安全を損なうことにはならない⁵⁸⁾として、疲労耐久性の観点からの制限や規定は特に設けられておらず、疲労亀裂の発生は想定していなかったと理解できる。以上の結果、疲労耐久性に関する記述は、S32 溶示の内容が S39 溶示でもほぼ踏襲され、鋼部材の疲労耐久性についての理解や要求水準はこの間で特段の変化はなかったとみられる。

なお、溶接に関して、許容される継手形式や性状、施工条件、欠陥の補修方法などの施工品質に関する事項は、当時より基準改定毎に見直され充実している。そして、多くの内容は、現在の理解では耐荷力性能の信頼性確保のみならず疲労耐久性の向上にも寄与する内容であり、実態としての耐久性そのものは改定を経て確実に向上しているとみられる。

1973（昭和 48）年には、道路橋の設計・施工の基準を使用材料や構造形式によらず一つの体系に整理するとの方針のもとで S48 道示が発刊された。S48 道示では、溶接による残留応力の影響を考慮して鋼材の許容応力度や溶接継手の構造細目に関する規定が見直された⁵⁹⁾。しか

し、鋼部材の疲労耐久性に関しては、S32 溶示の各溶接継手に関する規定の解説にける疲労強度に関する文言が削除され、溶接継手の施工法や構造細目に関する種々の規定は、あくまで所要の耐荷力性能を確実に得るためのものであるとの解釈で統一されている。

その一方で、鋼床版に関して、条文には明記されていないものの、交通実態と鋼床版の溶接構造の特徴から、鋼床版は相対的に疲労強度が低い可能性が高いこと、及び鋼材の種類と許容応力度の選定にあたっては必要に応じて疲労耐久性について考慮すべきことが解説に示された⁶⁰⁾。さらに、プレートガーダーの引張フランジに関する解説においても、重ね合わせフランジとする場合には疲労強度が問題となることがある旨が明記された⁶¹⁾。

このように、S48 道示において初めて、軌道併設などの特殊な条件の場合のみならず、一般的な条件の鋼道路橋であっても、構造によっては疲労損傷が問題となり得るとの理解が明確にされた。また、溶接継手に関する品質検査基準についても、当時最新の JIS の規格と疲労強度との関係を踏まえた上で疲労耐久性に考慮して安全側の規定化がなされている。具体的には、例えば、鋼床版やプレートガーダーでは許容応力度を抑える対策が規定され（図-9、10）⁶²⁾、ケーブルについては安全率を確保することで応力と頻度の関係による規定は見送られている（図-11）⁶³⁾。さらに鋼管構造では溶接の仕様によって耐久性向上が図られている（図-12）⁶⁴⁾。また、S48 道示では疲労耐久性に大きな影響を及ぼす溶接部の内部欠陥についても検査規準が設けられた（図-13）⁶⁵⁾が、これによることの効果や目標とした耐久性の水準については明確にされていない。

S48 道示以降、「道路橋示方書・同解説」として「I 共通編」、「II 鋼橋編」、「III コンクリート橋編」、「IV 下部構造編」、「V 耐震設計編」の 5 編構成の体系となり、1980（昭和 55）年、1990（平成 2）年、1994（平成 6）年、1996（平成 8）年と不定期に比較的大規模な改定が行われた版（以下、それぞれ「S55 道示」⁶⁶⁾、「H2 道示」⁴¹⁾、「H6 道示」⁶⁷⁾、「H8 道示」³⁶⁾という。）が出されている。その間、鋼部材の疲労耐久性に関しても、都度様々な見直しが加えられてきたものの、基本的な規定内容はそれまでの示方書と同じである。すなわち溶接継手の形式や品質などに一定の配慮を求めるものの、鋼床版を含む、部材や構造に対して具体的な応力変動の繰返し回数や設計上の目標期間などの時間の概念は示していない。すなわち、疲労耐久性照査の観点からは定性的あるいは経験的な手法によって所要の疲労耐久性が得られるものとされてきたといえる⁶⁸⁾。

図-14 は著者らが、閉断面リブ形式の鋼床版のデッキプレートと閉断面リブ溶接部に発生したき裂について、大型車交通量と調査時点の供用年数との関係を整理した

第6章 床版

6.2 鋼床版

6.2.6 許容応力度の割増し

〔解説〕・・・略・・・

鋼床版は直接その上に輪荷重が作用する部材であり、近年における交通の実態から判断すると、作用するくり返し応力の振幅が大きく、かつくり返し回数も多く非常に苛酷な載荷状態にさらされている。そのうえ、鋼床版は溶接によって組立てられているので、その疲労強度はあまり高くない。このように鋼床版は疲労に対しては非常に多くの問題ををはらんでいる。現在までのところ、鋼床版にはあまり強度の大きい鋼材は使用されていないが、表-6.2.2 に示した以外にさらに強度の大きい鋼材を使用する場合にはその溶接部の疲労強度は静的強度に比例して大きくなるものではないので、疲労実験の結果なども参考にして許容応力度を定めるのがよい。・・・略・・・

※「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 1973 (昭和 48) 年」⁴⁰⁾より抜粋。

図-9 S48 道示における鋼床版の疲労に関する記述

第8章 プレートガーダー

8.3 フランジ

8.3.3 フランジを2枚用いた場合の外側フランジの板厚

〔解説〕

・・・略・・・

引張力を受けるフランジにおいては、疲労強度が問題となるので、これらの規定以外に内側フランジプレートに作用する応力度が許容応力度の90%に達する所まで延長することとした。

・・・略・・・

※「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 1973 (昭和 48) 年」⁴⁰⁾より抜粋。

図-10 S48 道示における鋼桁の疲労に関する記述

第12章 ケーブル

12.5 引張強さと安全率

〔解説〕

・・・略・・・やはり死荷重応力に対する活荷重応力の比が比較的大きくなることのある斜張橋のケーブルもそうであるが、正しくは疲労強度に関するデータをもとに活荷重応力発生頻度との関連を規定すべきであろう。しかし現在ではまだデータが不足しているので、その規定を見送ることとした。

※「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 1973 (昭和 48) 年」⁴⁰⁾より抜粋。

図-11 S48 道示におけるケーブルの疲労に関する記述

ものである⁶⁹⁾。大型車の累積台数が疲労損傷発生と関係する可能性があるものの、実際の疲労き裂の発生時期には大きなばらつきがあることが窺える。2000年頃からは、主桁や鋼製橋脚の隅角部等の主要部材で重大な疲労き裂の発生の報告が相次いだ⁷⁰⁾。

また、幹線道路での厳しい重交通の実態から、将来の疲労被害の拡大が懸念された。そのため、H14 道示では鋼橋の設計において、部材条件によらず等しく疲労設計

第13章 鋼管構造

13.6 構造細目

13.6.6 単一鋼管部材

鋼管を細長比の大きい吊材、支柱、トラス部材などに使用する場合は風による振動を制限するためその鋼管の外形は式(13.6.4)を満足しなければならない。・・・略・・・

止むを得ずガセットプレートやリブをとりつける場合はその先端は疲労強度が低下しやすいので、13.6.3 の規定により溶接を行った後になめらかに仕上げなければならない。

〔解説〕

・・・略・・・以上のようにこの条の規定はあくまで振動の大きさや頻度を制限するものであるからこの条の規定によって設計を行った場合でも多少の振動の発生がありうる。したがって部材の端部では必ず全周溶接を行って疲労強度の低下を防ぐこととした。・・・略・・・

※「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 1973 (昭和 48) 年」⁴⁰⁾より抜粋。

図-12 S48 道示における鋼管構造の疲労に関する記述

第15章 施工

15.3 工場製作

15.3.3 溶接 (12) 1) 突合せ継手の内部欠陥に対する検査

主要部材の突合せ継手は、表-15.3.8 に示す標準以上について放射線透過試験を行うものとする。放射線透過試験はJIS Z 3104「鋼溶接部の放射線透過試験方法および透過写真の等級分類法」によって行うものとし、・・・略・・・

〔解説〕

・・・略・・・道路橋でも部分的に疲れ強さを問題とする場合があることなどを考慮して、引張側2級以上、圧縮側3級以上と定めた。・・・略・・・

※「道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 1973 (昭和 48) 年」⁴⁰⁾より抜粋。

図-13 S48 道示における溶接の内部欠陥に関する規定の例

図-14 疲労き裂と大型車・供用年数の関係⁶⁹⁾

を行うことが規定された。

ただし、定量的な照査方法や評価基準は、統一的に示せるだけの知見がないとして規定されず、適切な方法で行うべきことのみが要求された。一方で、実質的に唯一の技術基準であるH14道示に準拠した道路橋の耐久性に

大きなばらつきがあることは望ましくないことから、道路橋示方書の改定に併せて鋼道路橋の設計において疲労の影響を考慮するにあたっての基本的な考え方や具体的な照査方法の例などについてとりまとめた「鋼道路橋の疲労設計指針 2002 (平成 14) 年」(以下「H14 疲労指針」という。) ⁷⁰⁾ が公開された。H14 疲労指針では、継手の疲労強度等級や疲労照査に用いる自動車荷重の標準的な扱い方などが最新の知見に基づいて示され、これに準拠することで、少なくとも 100 年程度の疲労耐久性が確保でき、H14 道示の求める耐久性能が満足されるとみなしてよいものとされた。H14 疲労指針に示される方法は、疲労強度が著しく劣る溶接継手の形式や過去に疲労損傷が報告されている構造の採用を避けることや施工品質などの条件を満足させるといった定性的対応だけでなく、基本的には活荷重に対して定量的に照査を行って疲労耐久性を満足させることが合理的であるとの考えにたち、H14 道示に対応する形で 100 年間の活荷重等によって部材に生じる応力変動の影響を定量的に評価できる道路橋に対する統一的な設計方法を初めて具体的に示した点が大きな特徴である(図-15) ⁷²⁾。そして、H14 疲労指針では、設計外力として H14 道示の活荷重規定と同様の自動車荷重データに基づき、疲労照査に用いる荷重強度の標準を示すとともに、設計供用期間に想定する交通量(標準は 100 年間)に相当する繰返し载荷の影響を考慮することを基本としている。抵抗側は「鋼構造物の疲労設計指針・同解説 1993 (平成 5) 年」(以下「JSSC 疲労指針」という。) ⁷³⁾ の考え方に準じて溶接継手毎の強度等級が設定された。すなわち、既往の実験データの分析から非超過確率 97.7% を基本に、許容できる限界の応力変動幅と繰返し回数の閾値を設定し、これを満たすことで所要の疲労耐久性があるとみなすことができるとしている。

しかし、JSSC 疲労指針で根拠とされた疲労試験のデータは、継手形式によらず相当のばらつきを有しているため、H14 疲労指針による疲労設計の方法は、少なくとも設計で考慮する期間は、ほぼ疲労損傷が発生しないことを保証しようとしたものといえる ⁷⁴⁾。すなわち、これによることで一定水準以上の疲労耐久性が担保されるものの、個々の橋で実際に疲労損傷が生じる時期は、交通荷重のばらつきも影響して、根拠となった実験データ以上にばらつくことは避けられない。また、実際の交通荷重が設計での想定と大きく乖離することも確実である。

なお、道路橋示方書は、H14 道示改定以降の知見を盛り込むとともに、2011 (平成 23) 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の教訓を踏まえて 2012 (平成 24) 年 2 月に改定(以下「H24 道示」という。) ⁷⁵⁾ された。

このとき耐久性に関する規定についても分野毎に最新の知見を盛り込むための検討が行われた。その結果、鋼橋の設計については、これまで H14 疲労指針に委ねてい

図-15 疲労設計の流れ ⁷²⁾

た具体的な疲労耐久性照査法のうち、耐久性評価に関する要求水準の目安を示す溶接継手の疲労強度等級などが H24 道示に条文規定として盛り込まれた。しかし、疲労設計として求められる要求性能やそれを達成するための手段については鋼床版のデッキプレートの最低板厚の見直しなどの一部を除き大きな変更はなされていない。

以上のように、疲労に対して、H14 道示以降の道路橋は設計において 100 年の耐久性を目標とすることとなった。しかし、基準では下限値が制御されているだけで、個々の橋梁の溶接継手の疲労耐久性には大きなばらつきがあると考えられ、H14 道示以前の橋に比べて劣化傾向に変化がみられるかどうかについては今後実績データを蓄積することで初めて明らかになるものと考えられる。

4. コンクリート部材の耐久性に関する規定の変遷

コンクリート橋の設計に用いる技術基準としては、1931 (昭和 6) 年に土木学会により「鉄筋コンクリート標準示方書」(以下「S6 コン標」という。) ⁷⁶⁾ が制定された。標準示方書はその後、1949 (昭和 24) 年には構造物毎に分冊され、1956 (昭和 31) 年には「鉄筋コンクリート標準示方書」(以下「S31 コン標」という。) ⁷⁷⁾ により施工管理に関する規定が設けられるなど、数度の改定が行われ、この間、コンクリート道路橋の設計・施工にあたっては、土木学会の標準示方書が国内の統一的な

第3章 材料

11 条 海水

鉄筋コンクリート用コンクリートをつくるには、海水を用いてはならない。

〔解説〕

・・・少なくとも、電流の影響を予想される鉄筋コンクリート構造物では、海水を用いない方が安全である。

※「コンクリート標準示方書 鉄筋コンクリート標準示方書 1956 (昭和31年)」⁷⁾より抜粋。

図-16 S31 コン標における海水の使用禁止に関する記述

技術的見解として参照された。しかし、標準示方書の適用範囲は道路橋に限られたものではなく、また設計施工技術の進展に伴って、道路橋の設計施工に特有の事項などについての技術基準の充実が必要となったこともあり、1964 (昭和39) 年には「鉄筋コンクリート道路橋設計示方書・解説」(以下「S39 コン道示」という。)⁷⁸⁾が道路橋に対する技術基準としてとりまとめられた。その後は、道路橋示方書が道路橋に対する設計施工の統一的な技術基準として主に適用されている。

S39 コン道示が適用される以前のコンクリート標準示方書では、材料の選定方法、施工方法、品質管理手法などの様々な事項について、耐久性確保の観点から規定されており、例えば、S31 コン標では、材料に関する規定において、鉄筋コンクリートへの海水の使用が禁止されているが、その目的はいわゆる鉄筋腐食に至る塩害を考慮したものではない(図-16)⁷⁹⁾。

また、気象作用の影響として、当時より凍結融解作用に対しては図-17 に示すように材料に関して言及されている⁸⁰⁾以外に、水セメント比の最大値が制限⁸¹⁾されており、少なくともこれらが耐久性確保の障害になりうると認識されていたことがわかる。さらに、かぶりについても最低値の標準が規定されており、気象作用の影響、コンクリート表面からの有害物質の影響を考慮したものとされているが、根拠は経験的なものに過ぎないと解説されている(図-18)⁸²⁾。

このように道路橋に特化してコンクリート部材の基準が策定された昭和39年以前より、当時の適用基準に従うことで具体的にどのような耐久性の水準が達成されると見込まれるのかについては明確にされていないものの、材料品質や架橋環境条件によっても道路橋のコンクリート部材が劣化しうるとの認識があったことは確実であり、後述する規定とその解説から推測されるように鋼部材の場合と同様に基準の検討にあたっては古くより劣化への対策については議論がなされ、時々の知見に照らして必要な対応が図られてきたものと考えることができる。

S39 コン道示は、S31 鋼示、S39 溶示、S39 下部指針あるいはS31 コン標などの同時期に制定されていた示方書等の技術基準類と併用される前提で規定が定められてお

第3章 材料

15 条 耐久性

・・・略・・・

(2) 損失重量が(1)に示した限度をこえた細骨材は、これを用いた同程度のコンクリートが、予期される気象作用にたいして十分な耐久性を示した実例がある場合には、責任技術者の承認をえて、これを用いてよい。

(3) 損失重量が(1)に示した限度をこえた細骨材は、これを用いた実例がない場合でも、これを用いてつくったコンクリートの凍結融解試験結果から、責任技術者が満足なものであると認めた場合には、これを用いてよい。

・・・略・・・

※「コンクリート標準示方書 鉄筋コンクリート標準示方書 1956 (昭和31年)」⁷⁾より抜粋。

図-17 S31 コン標における気象作用の考慮に関する記述

第19章 一般構造細目

125 条 かぶりの一般標準

・・・略・・・

かぶりは一般に表11の値以上でなければならない。・・・略・・・

〔解説〕

かぶりは設計者が経験をもとにして、用いる材料、構造物のうける気象作用、コンクリート表面に作用する有害物質の影響、部材の寸法、構造物の重要さの程度、施工技術の良否、等から判断してこれを定めなければならない。

・・・略・・・

※「コンクリート標準示方書 鉄筋コンクリート標準示方書 1956 (昭和31年)」⁷⁾より抜粋。

図-18 S31 コン標におけるかぶりの規定

り、コンクリート道路橋の上部構造の設計についての技術基準が最新の知見を元に規定されている。しかし、耐久性に関しては他の技術基準類同様に、定量的な規定や設計上の目標期間などの時間の概念については定められていない。その後、プレストレストコンクリート橋が普及するのに対応して、1968 (昭和43) 年に「プレストレストコンクリート道路橋示方書」(以下「S43PC 道示」という。)⁸³⁾が制定され、さらに1978 (昭和53) 年にはS39 コン道示と一体化する形で改定され、「道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編」(以下「S53 コン道示」という。)⁸⁴⁾として以降の道路橋示方書の体系の一部となった。

S53 コン道示では、コンクリート部材の耐久性に関し、「床版および支間10m以下の床版橋」に用いる引張応力度の許容応力度が他の場合に比べて小さい値に抑制されている⁸⁵⁾。これについては、コンクリートに生じたひび割れが繰返し载荷の影響で大きくなりコンクリートの剥離や脱落に至ることを防止するためと解説されている。なお、具体的な値の設定については、「コンクリート標準示方書」の鉄筋の疲労強度を基に定められた値より小さくされたと解説されているものの、設計上は、こ

れが床版の耐荷力に対して安全余裕がどのレベルでどの程度の期間確保されるものであるのかは示されていない。このほか、図-19 に示すとおり、S53 コン道示では床版の設計に関連して大型車両の交通量に応じて設計曲げモーメントの割増し規定が設けられており、床版の疲労耐久性への配慮であると解説されているものの、この規定に関しても割増しの効果が定量的にどのように耐久性向上に寄与するのかについては明らかでない。

図-20 は、図-5 同様に著者らが全国の道路橋の定期点検結果を用いてコンクリート床版のひびわれの状態確率分布を求めた例⁹⁾である。床版の耐久性に係る規定が大きく変更された昭和 48 年道示を境に母集団を分けて整理している。詳細は文献⁹⁾によるが、適用基準によって劣化傾向に明確に差があること、それと同時に各母集団に含まれる個々の部材の劣化特性には大きなばらつきのあることがわかる。

S53 コン道示以降、2 章で述べたように 1980 年（昭和 55 年）には道路橋示方書が現在と同じ 5 編構成となり、国として公告する道路橋の設計基準としては道路橋示方書のみで最低限完結することとなった。そして現在に至るまで土木学会のコンクリート標準示方書など学協会から発刊される技術資料の動向も踏まえつつ、現行の H24 道示に至るまで改定が繰り返されてきているが、疲労に関しては規定内容には大きな変更は行われておらず、具体的にどのような荷重条件を想定して定量的にどの程度の耐久性が確保されるとみなしているのかについては明らかでない。なお、1980 年以降は、道路橋示方書が道路橋に特化して完結した設計基準として国から通達されているため、各種学協会の技術資料が道路橋示方書による以外にどの程度実務で反映されているのかについては明らかではない。また、道路橋示方書の改定にあたっては、意見照会などにより産学官の最新の情報が反映されるとともに適用基準として調達においても反映される。このため、本研究では疲労に限らず 1980 年以降については道路橋示方書の規定内容を基本に整理を行った。

飛来塩分に起因する塩害については、昭和 50 年代になって耐久性の観点から特別な配慮を行わないと、道路橋の設計で一般に期待する期間に対して耐久性が確保されない可能性があることが、国等が大規模に実施した既設橋の損傷実態調査⁸⁹⁾の結果からも認識され、「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説 1984（昭和 59）年」（以下「S59 塩対指針」という。）⁸⁹⁾がとりまとめられた。

この指針では、架橋位置の塩分環境に応じて、耐久性確保のために特別なかぶり厚を確保するなどの設計方法が設定された⁸⁸⁾。

なお、S59 塩対指針は、道路橋示方書と同様に国土交通省（当時、「建設省」）の通達として出されている。

また、その対象は大気中に含まれる塩分である飛来塩

第 5 章 床版

5.2 設計一般

計画交通量のうち大型車両が 1 日 1 方向 1000 台以上の橋の床版の T 荷重（衝撃を含む）による設計曲げモーメントは、5.5.1 の(1)項に規定する設計曲げモーメントに表-5.2.1 の割増し係数を乗じた値とするものとする。

・ ・ ・ ・ ・

〔解説〕

道路橋の床版は自動車荷重が直接載荷されるので、輪荷重の大きさと頻度が床版の耐荷力と耐久性に大きな影響を与える。したがって、重車輛の通行頻度が高い橋梁では条文に規定するように設計曲げモーメントを割増して床版の耐荷力と耐久性を確保しなければならない。

・ ・ ・ ・ ・

※「道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編 1978（昭和 53）年」⁸⁹⁾より抜粋。

図-19 S53 コン道示における床版の設計曲げモーメントの割増し規定

図-20 コンクリート床版のひびわれの状態確率分布の例

分がコンクリート表面から浸透して内部の鋼材が腐食に至る現象を対象とし、これを塩害として扱っている。

S59 塩対指針では、塩分環境に応じて全国を対策内容ごとに区分し、コンクリート構造の種別や使用される材料なども考慮するとともに最小かぶり厚さがそれぞれに細かく設定された。その根拠は、極めて大きなばらつきを有する全国の既設橋の実態調査の結果⁸⁹⁾を総合的に判断したものであり、かぶりの確保以外にも有害なひび割れが生じないような配慮が行われるべきことが定性的に求められるなど、これらの対策と設計上期待する鋼材腐食が防止できる期間の定量的な見積もりに関しては明確でない。一方でこれ以降のコンクリート橋では架橋環境や部材の種類などの条件毎には同じかぶり厚さが確保されることとなった。

飛来塩分による塩害については、耐久性向上を意図した H14 道示の制定にあたり、全国の損傷実態調査⁹⁰⁾を行い、S59 塩対指針の妥当性の評価と見直しの検討を行った。このとき H14 道示の規定には明示されていないが、鋼部材同様にコンクリート部材についても、基準としての耐久性確保の目標となる設計供用期間の標準は 100 年を目安とされ³⁰⁾、この期間の経年的な劣化の影響が考慮されるよう、飛来塩分による塩害を含む耐久性に関係するすべての規定の内容が検討されている。

具体的には、実態調査の結果に対して、過去に計測されたそれぞれの調査地点近傍の飛来塩分量が、コンクリート内部への塩分浸透過程を拡散方程式に従って浸透すると仮定した場合に、塩害による損傷発生の可能性と供用年数との関係がどの程度適合するかが評価されている。その結果、拡散方程式による「供用年数」と「海岸線からの距離」の関係を 1km 換算の飛来塩分量に対して+1 σ 程度の幅をもって評価することで概ね実態が説明できることが明らかになった。そのため、条件毎に内部鋼材の位置の塩分濃度が鋼材の腐食限界量を超えるまでに少なくとも 100 年以上要するとみなせることを基本に必要最小かぶり厚の設定を行い、その結果が H14 道示に反映された。

H24 道示の改定にあたっては、H14 道示における改定の妥当性を確認するために、国土技術政策総合研究所において再度、全国的な塩害実態調査⁹⁰⁾を行っている。その結果、H14 道示の規定を見直す必要があるとの明確な情報は得られなかったため、H14 道示の規定がそのまま踏襲された。なお、全国の塩害実態調査の結果からは、主に塩分濃度とコンクリートの材料特性によって整理される拡散方程式による塩害による損傷発生の推定結果と実態には大きな乖離が見られる。このように、実橋での被害状況には極めて大きなばらつきが生じており、これに対して基準の規定と同じ信頼性をもつかぶり厚さを拡散方程式等にそれぞれの橋梁の条件を反映して設定することは実質的に困難な状況となっている。すなわち、環境条件や施工品質の影響を除けば、この規定に従うことによって抵抗側としては画一的な耐久性を有するものの、作用側の条件に対しては個別の条件が十分に反映されておらず、現実に期待される耐久性能は個々の橋梁で大きくばらつくものと考えられる。

飛来塩分による塩害以外のコンクリート部材の代表的な耐久性阻害要因には、海砂の使用などによる材料起因の塩分による塩害とアルカリ骨材反応（以下「ASR」という。）がある。

これらの問題については、コンクリート構造物の早期劣化が問題となった昭和 50 年代後半から各方面で研究がすすめられ、旧建設省が主導した「コンクリートの耐久性向上技術検討委員会（昭和 60～62 年）」（以下「コンクリート総プロ」という。）により土木・建築の両分野で実態の解明と対策の検討が行われた⁸⁹⁾。塩害実態調査では、海砂が塩害に及ぼす影響については、土木構造物に明確な影響が見られなかったものの、建築構造物では影響が確認された。このため、最終的には将来的に影響が生じる可能性も考慮して、両分野共で生コンクリートやグラウトなどの材料に含まれる塩化物の総量規制値が定められ、大臣官房技術審議官通達「コンクリート中の塩化物総量規制について」（昭和 61 年建設省技調発

第 16 章 施工

16.4 材料

・・・略・・・

(I)10) フレッシュコンクリート中の塩化物含有量は、鉄筋コンクリート部材、ポストテンション方式のプレストレストコンクリート部材においては塩素イオン重量で 0.60kg/m³ 以下とし、プレテンション方式のプレストレストコンクリート部材およびオートクレープ養生を行う製品においては塩素イオン重量で 0.30kg/m³ 以下とする。

・・・略・・・

※「道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編 1990（平成 2 年）」⁴⁰⁾より抜粋。

図-21 H2 道示における塩化物含有量に関する記述

第 3 章 使用材料

3.2.2 コンクリート材料

・・・略・・・

(I)3) 細骨材は、清浄、強硬で耐久性と適度な粒度を有するとともに、ごみ、泥、有機不純物、塩化物等を有害量含まれてはならない。

4) 粗骨材は、清浄、強硬で耐久性と適度な粒度を有するとともに、薄い石片、有機不純物、塩化物等を有害量含まれてはならない。

・・・略・・・

〔解説〕

・・・アルカリ骨材反応に対しては、国土交通省からの通知（アルカリ骨材反応抑制対策について（平成 14 年 7 月 31 日））または、JIS A 5308 附属書 B に示されている対策を講じれば、アルカリ骨材反応を抑制することができる。

・・・略・・・

※「道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編 2012（平成 24 年）」⁹⁰⁾より抜粋。

図-22 H24 道示における ASR に関する記述

第 285 号）として周知された。同じ内容は、H2 道示にも反映され（図-21）⁹²⁾、基本的な内容は現在に至るまで踏襲されている。

ASR については、米国など海外では 1930 年代より問題として認識されていた。国内ではコンクリート総プロ開始以前の 1980 年代に、阪神地区で多数のひび割れ損傷が顕在化したことを契機に本格的な調査や対策の検討が開始された。

まず、昭和 59 年に建設省技術調査室通達「土木工事に係るコンクリート用骨材の取り扱いについて」が出され、発症構造物の遮水と過去に ASR を生じた骨材に対する試験を行うべきことが通知された。その後のコンクリート総プロの中で骨材の選定、低アルカリ型セメントや混合セメントの使用、コンクリート中のアルカリ総量規制などの対策が検討され、その結果を踏まえて平成元年には、正式に「アルカリ骨材反応抑制対策について」（建設省技調発第 370 号、平成元年 7 月）が通達された。

その後も、試験方法やアルカリ総量規制値の見直しなどが繰り返されてきた。平成14年にはASRを生じた道路橋の橋脚で梁部の鉄筋の破断が確認され、全国的な実態調査や原因究明のための研究が各方面で行われた⁹³⁾。

しかし、結果的に新設時の対応としては、これまでと同様に、アルカリ総量の規制とASRを生じる可能性のある骨材の事前の排除による対策が現在まで継続されている(図-22)⁹⁴⁾。

以上のように海砂の使用による塩害、アルカリ骨材反応については、純粋に材料的な問題であることから、懸念のある材料を排除することで対応されてきており、経年劣化事象として目標とする供用期間との関係で制御するという考え方はとられてきていない。

その他のコンクリート部材の経年劣化要因としては、中性化、凍結融解作用、化学的侵食などもあるが、これらに対しては、過去より技術基準類で規定されてきた品質を満足する材料を用いるとともに、適切な施工品質が確保されることで、一般にこれらの要因に対する耐久性についての特別な検討は省略できるものとされ、少なくとも定量的な耐久性の評価基準や照査法等は示されてきていない。

以上のことから、コンクリート部材についても、鋼部材同様に耐久性向上を目的とした様々な対応が全国で一律に適用されてきた技術基準類によって実施されてきており、適用基準毎に耐久性には違いがあるものと考えられる。それと同時にこれらの技術基準類による対応は耐久性を精度よく制御するものとはなっておらず、既往の研究⁹⁾でも推測されているとおり、適用基準によらず既設道路橋のコンクリート部材の劣化特性には非常に大きなばらつきが生じていると推測される。

5. 結論

我が国で整備されてきた道路橋資産の合理的な維持管理体系の確立を念頭に、これまで道路橋の設計に適用されてきた技術基準の耐久性に関する規定の変遷を劣化予測の実現性の観点から整理した。

その結果、既存資産の将来予測を行うにあたっては、少なくとも以下の1)～3)について考慮する必要があることを確認した。加えて、将来の状態予測に基づく予防保全を効果的に取り入れた計画的な維持管理の実現性について、全国規模で収集された点検結果の分析から得られた劣化実態との関係を踏まえることで、4)、5)のことが言えることを示した。

1) 我が国の道路橋の設計基準やそこで前提とされている設計技術、品質管理技術の経緯や実態からは、設計上考慮する供用期間等の時間の概念は一貫して明確に

されてきていない。そして、主たる劣化要因に対する対策は耐荷力上の余裕を確保したり、構造細目規定や、材料・施工などの品質確保策といった経験的で定性的な手法がとられている。具体的には、鋼材腐食については鋼部材、コンクリート部材ともに一定以上の耐久性が見込まれる板厚やかぶり厚さなどの下限規定によってきた。また鋼部材の疲労では構造細目や施工品質を縛ることで長期の耐久性が確保できるとみなす対応が行われてきている。そのため既設道路橋が有する耐久性能には潜在的に大きなばらつきが避けられない。

- 2) 2002年(平成14年)に道路橋示方書が性能規定型となるまで、我が国の道路橋の設計基準は、耐久性に関しては、基本的に経験的に適当と考えられてきた仕様によって規定され、代替手法を選択できるような定量的な照査の方法や基準は示されてきていない。そのため国による標準設計の提供^{95)~97)}に象徴されるように同時期に建設された同型式の道路橋では近い耐久性を有している可能性がある。一方で、我が国の道路橋の設計は昭和初期より全国で同じ基準が適用されてきており、現在まで耐久性に係る規定も含めて不定期に度重なる改定を重ねてきている。以上の結果、建設年代毎にその適用基準に従ってほぼ同じ仕様による設計が行われた形式毎に、耐久性の特徴の相違が分類できる可能性がある。
- 3) 既存の道路橋のほとんどで橋の性能を支配する鋼およびコンクリートのそれぞれの部材の設計において耐久性について定量的には設計されておらず、主たる劣化現象である鋼部材の疲労やコンクリートの塩害では時々に見えに基づく必要最小限度以上を達成させる対応が行われている。そのためこれらに関する耐久性について適用された設計基準や架橋条件から明確に差別化することには限界がある。
- 4) 既存の道路橋の耐久性に関する規定では、溶接継手の形式やコンクリート床版の設計断面力や許容応力度の規定など、一定の構造細目の遵守や耐荷力性能に対する固定的な余裕の確保による対応がなされてきたものがある。この場合架橋環境条件の影響を除けば、同じ適用基準のものでは近い性能を有している可能性があり、全国規模の実績データの分析との対比からは、属性などの記録上差別化可能な条件によっても差がみられるものもある。これらについては適用基準や部材種類、架橋環境などの様々な条件で適切に分類区分することで類似した劣化の特徴を見いだせる可能性があり、劣化予測の信頼性を高めることができる可能性がある。ただし、個々の劣化特性には大きなばらつきが避けられないことから、その実現には十分な量の実績データの蓄積が不可欠である。
- 5) 性能規定型の設計基準の採用により、今後新たに整

備される道路橋では、適用基準が同じであっても耐久性に係る設計内容が橋毎に大きく異なってくる可能性がある。そのため材料選定から設計施工の各段階に対して定量的な耐久性の目標が達成できるよう具体的な要求性能を単に下限値で縛るだけでなく、一定の範囲でもってかつ一定の信頼性の範囲で実現されることを求めなければ、維持管理段階において状態変化の将来予測に基づいた予防保全などの計画的な維持管理を現状の既設橋以上の信頼性で行うことは困難になる。

この点においては現状の道路橋示方書の規定内容には課題も残されているといえる。

参考文献

- 1) 藤原稔, 岩崎泰彦: 橋梁の架替に関する調査結果 (I), 土木研究所資料 2723 号, 1989.1
- 2) 藤原稔: 橋梁の架替に関する調査結果 (II), 土木研究所資料 2864 号, 1990.3
- 3) 西川和廣, 村越潤他: 橋梁の架替に関する調査結果 (III), 土木研究所資料 3512 号, 1997.10
- 4) 玉越隆史, 大久保雅憲他: 橋梁の架替に関する調査結果 (IV), 国土技術政策総合研究所資料 444 号, 2008.4
- 5) 玉越隆史, 大久保雅憲, 横井芳輝: 平成 24 年度道路構造物に関する基本データ集, 国土技術政策総合研究所資料, No.776, pp.35-36, 2014.1
- 6) 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 実践的アセットマネジメント第 2 世代研究への展望, 土木技術者実践論文集, Vol.1, pp.67-82, 2010.3
- 7) 玉越隆史, 横井芳輝, 石尾真理: 全国規模の実測データによる道路橋の劣化特性とその定量的評価, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.70, No.4, pp.I_61-I_72, 2014.12
- 8) 玉越隆史, 横井芳輝, 石尾真理: 全国規模の道路橋点検データに基づく鋼橋の劣化の特徴, 鋼構造論文集, Vol.21, No.82, pp.99-103, 2014.6
- 9) 玉越隆史, 横井芳輝, 石尾真理: 全国規模の点検データに基づく道路橋のコンクリート部材の劣化の特徴, コンクリート工学論文集, Vol.25, pp.167-180, 2014.9
- 10) 玉越隆史, 川畑篤敬: 鋼道路橋床版の設計と留意点ー道路橋示方書改訂についてー, 第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.1-8, 2003.6
- 11) 川西龍彦, 小林朗: RC 床版の設計法の変遷と今後の課題, 第 1 回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.1-4, 1988.10
- 12) 堺淳一: 道路橋の耐震設計に関する技術基準の変遷, 道路, pp.54-59, 2014.2
- 13) 田村敬一: 地震荷重の変遷と展開ーその 2: 道路橋, 地震工学振興会ニュース, No.191, pp.191, 2003.7
- 14) 星隈順一, 張広鋒, 堺淳一: 橋梁の耐震性の向上に向けてー東北地方太平洋沖地震における耐震補強された橋の挙動ー, 土木技術資料, Vol.54, No.1, 2012.1
- 15) 道路技術研究会編集: 道路技術基準通達集ー基準の変遷と通達ー [第 7 次改訂], ぎょうせい, 2002.4
- 16) 佐伯彰一, 藤原稔: 道路橋示方書の変遷, 道路, p.38, 1989.6
- 17) 内務省: 道路構造令, 1919.12
- 18) 内務省: 道路構造に関する細則, 1928.3
- 19) 日本道路協会橋梁委員会: 道路橋示方書の改訂について, 道路, pp.20, 1976.6
- 20) 日本道路技術協会: 鋼道路橋設計示方書案解説, 日本道路技術協会編纂, 1939.6
- 21) 鋼構造委員会鋼橋の余寿命評価小委員会: 鋼橋の劣化現象と損傷の評価, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.21-36, 1994.10
- 22) 前掲 20), pp.94-95.
- 23) 前掲 20), p.99.
- 24) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, pp.160-161, 2012.3
- 25) (社) 日本道路協会: 鋼道路橋設計示方書, 1956.5
- 26) 前掲 25), p.115.
- 27) 前掲 24), pp.160-161.
- 28) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2002.3
- 29) 橋梁委員会: 道路橋示方書の改訂について, 道路, pp.23-32, 2002.4.
- 30) 前掲 28), p.7.
- 31) 前掲 28), II 鋼橋編, pp.181.
- 32) (社) 日本道路協会: 鋼道路橋塗装・防食便覧, 2005.12
- 33) 前掲 32), pp.I-18~I-25.
- 34) (社) 日本道路協会: 道路橋下部構造設計指針 くい基礎の設計篇, 1964.3
- 35) 前掲 34), p.66.
- 36) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 1996.12
- 37) 前掲 36), IV 下部構造編, p.395.
- 38) 前掲 28), IV 下部構造編, p.425.
- 39) (社) 日本鋼構造協会: 耐候性鋼橋梁の適用性評価と防食予防保全, 2009.9
- 40) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 1973.2
- 41) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 1990.2
- 42) 前掲 41), p.107.
- 43) 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会: 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (IV)ー環境条件調査結果ー, 共同研究報告書第 8 号, 1988.1
- 44) 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会: 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (VII)ー耐候性高力ボルトの暴露試験ー, 共同研究報告書第 11 号, 1988.1
- 45) 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会: 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (VIII)ー無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領 (案)ー, 共同研究報告書第 12 号, 1988.1
- 46) 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会: 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (VIII)ー無塗装耐候性橋梁の点検要領 (案)ー, 共同研究報告書第 57 号, 1991.3
- 47) 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会: 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XX)ー無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領 (改訂案), 共同研究報告書第 88 号, pp.1-7, 1993.3
- 48) 前掲 24), p.190.
- 49) 前掲 20), p.96.
- 50) 前掲 25), p.61.
- 51) 内務省: 電弧溶接鋼道路橋設計及製作示方書案, 溶接学会誌, Vol.10, pp.401-405, 1940.11
- 52) (社) 日本道路協会: 溶接鋼道路橋示方書解説, 1957.7
- 53) 前掲 52), p.5.

- 54) 前掲 52), pp.38-44.
- 55) (社) 日本道路協会: 溶接鋼道路橋示方書解説, 1964.5
- 56) 前掲 55), p.44.
- 57) 玉越隆史, 大久保雅憲, 星野誠, 横井芳輝, 強瀬義輝: 道路橋の定期点検に関する参考資料(2013年版) - 橋梁損傷事例写真集 -, 国土技術政策総合研究所資料, No.748, 2013.7
- 58) 前掲 55), pp.44-45.
- 59) 前掲 40), pp.65-75, pp.143-151.
- 60) 前掲 40), pp.194-195.
- 61) 前掲 40), pp.212-214.
- 62) 前掲 40), pp.194-195, pp.212-214.
- 63) 前掲 40), pp.295-297.
- 64) 前掲 40), pp.319-322.
- 65) 前掲 40), pp.347-367.
- 66) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 1980.2
- 67) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 1994.2
- 68) (社) 日本道路協会: 鋼橋の疲労, 1997.5
- 69) 川畑篤敬, 井口進, 内田大介, 松下裕明, 玉越隆史, 石尾真理: 鋼床版橋梁の疲労損傷を対象とした調査点検手法の立案に向けた実橋調査, 土木学会第5回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.241-246, 2006.7
- 70) 玉越隆史: 近年発生した橋梁の重大損傷の概要, 道路, Vol.816, No.3, pp.28-32, 2009.3
- 71) (社) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.3
- 72) 前述 71), p.26.
- 73) (社) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4
- 74) 玉越隆史: 道路橋示方書(鋼橋編)の疲労設計の考え方, 第6回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, Vol.6, pp.11-21, 2003.9
- 75) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2012.3
- 76) (社) 土木学会: 鉄筋コンクリート標準示方書, 1931.9
- 77) (社) 土木学会: コンクリート標準示方書解説 鉄筋コンクリート標準示方書, 1956.11
- 78) (社) 日本道路協会: 鉄筋コンクリート道路橋設計示方書解説, 1964.6
- 79) 前掲 77), p.110.
- 80) 前掲 77), p.112.
- 81) 前掲 77), pp.117-119.
- 82) 前掲 77), pp.171-172.
- 83) (社) 日本道路協会: プレストレストコンクリート道路橋示方書・同解説, 1968.3
- 84) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, 1978.1
- 85) 前掲 84), pp.147-149.
- 86) 建設省, (財) 国土開発技術研究センター: コンクリートの耐久性向上技術の開発, 建設省総合技術開発プロジェクト報告書, 1988.11
- 87) (社) 日本道路協会: 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説, 1984.2
- 88) 前掲 87), pp.12-16.
- 89) 池田道政: 塩害によるコンクリート橋の損傷状況調査結果, 道路, 1984.2
- 90) 中谷昌一, 玉越隆史, 内田賢一, 廣松新, 池田明寛: コンクリート橋の塩害対策資料集-実態調査に基づくコンクリート橋の塩害対策の検討-, 国土技術政策総合研究所資料 55 号, 2002.11
- 91) 玉越隆史, 窪田光作, 星野誠, 横井芳輝: コンクリート橋の塩害対策資料集(第3回塩害調査), 国土技術政策総合研究所資料 711 号, 国土技術政策総合研究所, 2012.12
- 92) 前掲 41), pp.293-298.
- 93) 土木学会: アルカリ骨材反応対策小委員会報告書, コンクリートライブラリー124, 2005.8
- 94) 前掲 75), III コンクリート橋編, pp.82-85.
- 95) 建設省土木研究所: 「道路橋標準設計図集」, (社) 日本道路協会, 1959.1
- 96) 建設省: 「建設省土木構造物標準設計」について(建設省土木構造物標準設計取扱要領), 建設事務次官通達, 官技発第3号, 1965.7
- 97) 建設省: 土木構造物標準設計 13~17 巻, 全日本建設技術協会, 1969.7

(2014. 5. 21 受付)

HISTORY OF DURABILITY PERFORMANCE REGULATION OF THE DESIGN SPECIFICATION FOR HIGHWAY BRIDGES IN JAPAN FROM A VIEWPOINT OF DEGRADATION PREDICTION FOR MAINTENANCE

Takashi TAMAKOSHI, Yoshiteru YOKOI, Mari ISIO and Toshiro KAMADA

Huge quantities of aged highway bridges in Japan are required to be maintained in sound condition under a severe budget constraint. Then, it is important to clarify the feature of degradation of highway bridges based on inspection data of target structures. However, it is thought that the feature of degradation of highway bridges are subjected to the strong influence of design specifications applied to them. In this paper, history of design specifications used for construction of highway bridges in Japan until now was investigated from a viewpoint of durability. As a result, it became clear that degradation prediction could be possible by referring design specifications for each highway bridges.