

1. アセットマネジメント手法

1. 1 概要

アセットマネジメントとは、その構造物の置かれている状態を適切に把握した上で個々の構造物に対して将来の健全度を予測し、必要な補修・補強等の措置の最適な時期と方法を判定して、ライフサイクルコストが最小となるような管理計画を実現させるものである。管理計画には、個々の構造物に対するものと、構造物群として捉えるものの2種類に大別できる。後者にあつては、予算制約や投資の平準化なども加味された計画である。図-1.1.1に、道路アセットマネジメントの考え方を示す。

アセットマネジメントシステムを構築するにあつては、構造物の現状を精度よく把握した上で、適切な健全度予測を行う必要がある。これらは、構造物の部材、損傷の種類毎に行われることが多く、評価、予測手法の適用にあつては、適用可能な部位・部材、手法といった適用範囲の基本的特性などを適切に把握しておかなければならない。

当研究室では、膨大となった道路構造物のストックを適切かつ効率的に管理するために、直轄道路橋が保持している橋梁の諸元、点検、補修履歴等のデータを用いて、必要かつ可能な範囲の健全度予測を実施する橋梁アセットマネジメントシステムに不可欠な健全度（劣化）予測手法等の提案を行った。

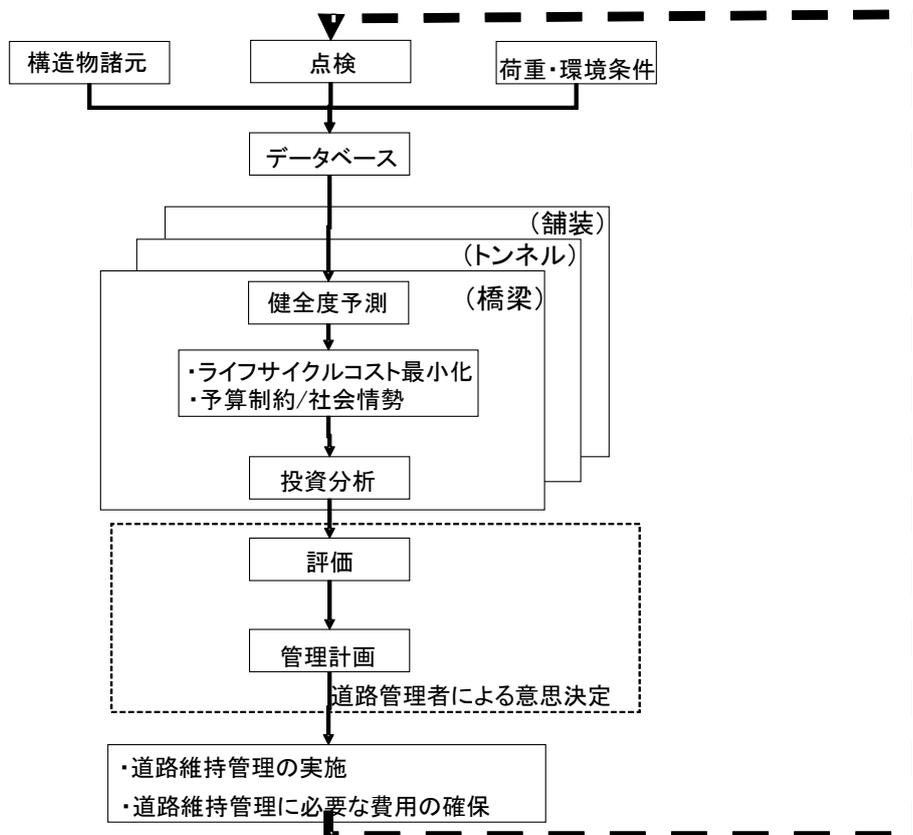


図-1.1.1 道路アセットマネジメントの考え方

1. 2 アセットマネジメント活用概念（方法）

アセットマネジメントには、マクロマネジメントとマイクロマネジメントの2つの概念がある。

マクロマネジメントとは、橋梁等の構造物を群として捉え、群全体としての最適な中・長期の維持管理計画の策定を目指すものである。例えば、管理している全ての橋梁を群として扱い、事後保全と予防保全の比較を行いライフサイクルコストの違い等を試算し、管理費用を最小化するとともに必要予算額を把握する、あるいは将来の投資の平準化を含めた投資予算の最適化を目指す、等である。その結果は、毎年の投資可能な予算制約が反映され、かつ行政上年度毎の予算の極端な増減は非現実的であることから毎年の予算の平準化も加味され、その上で群としてのライフサイクルコストを最小とするとした全体最適管理計画である。

マクロマネジメントの考え方は、同一グループの部材においてはある時期に一定割合の補修が必要になると仮定したもので、これは、特定の個々の橋梁においては環境条件から材料特性まで様々であることから一概にこういう仮定は成立しないものの、あるまとまりを持った母集団に対してはある程度の確からしさが生じてくるという、いわば、大数の法則的な考え方である。具体には、例えば5年後には全橋梁の〇%の橋梁において塗装の塗り替えに〇億円のコストが必要になるという計画を策定するもので、必要な費用を確保することにのみ意義があり、実際にどの橋梁の塗り替えを行うかはその時点での個々の橋梁の劣化状況を判断して決定することとなる。

マクロマネジメントにおける維持管理計画策定の方法としては、大きく2つに大別される。一つは、後述のマイクロマネジメントとして個々の橋梁の最適な維持管理計画を策定し、それを合算する方法である。もう一つは、各橋梁の部材（例えば床版）を群として捉え、例えば5年後には床版全体の〇%が補修が必要なまでに劣化すると予測（この際、個別橋梁は念頭に置かない。）するもので、米国の *pontis* が例として上げられる。両者とも、最終的には群としての将来予測であることから、厳密なまでの予測精度は求められない。

一方、マイクロマネジメントとは、個々の当該橋梁について、現状から将来の状態を予測し、いつ、どのような対策をすればよいか等、個別最適管理計画の策定を目指すものである。しかしながら、個々の橋梁は、架設環境、使用材料、交通量等がすべて様々であるとともにこれらの履歴も個々に異なっている。1橋1橋で異なる環境等を全てパラメータとして予測曲線を作成することは非現実的であり、また現在の知見での予測精度はかなりな幅を持ったものである。したがって、マイクロマネジメントとして、実際に行うべき補修時期と補修方法の将来予測を正確に行うのはほとんど不可能であると考えている。

1. 3 アセットマネジメントにおける留意事項

1. 3. 1 概要

アセットマネジメントは、将来の維持管理を効率よくかつ合理的に実施するために、補修時期、補修方法を適切に設定して維持管理費を最小とすることを目的としている。このためには、損傷に対する健全度を予測した上で適切な補修時期と補修方法を選定する必要があり、将来の健全度をいかに精度よく予測するかが課題となる。健全度予測については、各方面で研究が実施されているものの、精度等の課題が多いのが現状である。

以下に、健全度予測手法を構築するに際しての留意事項を概観する。

1. 3. 2 橋梁の健全度予測手法

橋梁の健全度予測手法には、表-1.3.1 に示すとおり、寿命を設定する方法、理論的な劣化予測式による方法、点検結果等の実績を統計的に分析する方法、遷移確率を用いた方法がある。これらには、同表に示す特徴及び課題があり、どの方法を採用するかは、これらを理解し、また、使用データ、使用目的を勘案した上で決定する必要がある。

表-1.3.1 健全度予測手法の比較

手法	概要	特徴及び課題
寿命設定 ^{注)}	橋梁各部材毎に寿命を設定し、建設時点あるいは補修時点を「健全」、寿命時点を「要補修」段階として、予測直線又は曲線を作成。	<ul style="list-style-type: none"> 個別橋梁の部材毎に補修時期が確定的に算定できる 寿命設定の根拠付けが課題 寿命に至るまでの劣化進行速度の設定が課題
劣化予測式 (理論式)	劣化メカニズムに応じた理論的予測式を使用。 (例：塩化物イオン量の浸透速度の予測、中性化速度の予測、RC床版の疲労損傷速度の予測)	<ul style="list-style-type: none"> 個別橋梁の部材毎に補修時期が確定的に算定できる 予測式の理論的根拠が明確である 現時点では、理論的予測式を適用できる劣化要因が限定される 劣化予測のための調査データが必要
点検結果の統計分析	点検結果に対応する健全度と経過年の関係を統計分析することで、予測直線又は曲線を作成。 部材毎、劣化要因毎に、環境条件、架設年次等でカテゴリー区分し、予測式を作成。	<ul style="list-style-type: none"> 個別橋梁の部材毎に補修時期が確定的に算定できる 点検結果に基づく分析であり、設定根拠が明確である 劣化要因や各橋梁の環境条件、交通条件等により、点検データを分類することで、予測精度の向上が可能 予測精度は点検データの性質に依存する
遷移確率	各健全度ランク間の遷移確率を用いて、各健全度ランクの比率の推移をマルコフ過程により計算。 遷移確率は、部材毎、劣化要因毎に複数年の点検結果を用いて算定。	<ul style="list-style-type: none"> 個別橋梁の部材毎には、補修時期、補修費用が算定できない 個別橋梁の短期計画への反映が困難 点検結果等により遷移確率を設定するため、根拠が明確である 橋梁群を対象とした管理に有効

注) ここでの寿命とは、建設後あるいは補修後から「要補修」の時期に至るまでの期間をいう。

(1) 寿命設定

対象とする部材の寿命（耐用年数）を設定し、建設時点あるいは補修時点を「健全」、耐用年数に達した時点「要補修」として、中間段階は直線や曲線の予測式とする方法である。なお、点検結果に応じて劣化予測を修正し、耐用年数以前に補修するという変更は可能である。耐用年数が設定でき、当初設計の段階から補修や交換を前提としている部材に対しては有効な方法である。しかし、主桁等の構造部材など橋梁の設計供用年数まで本来耐久性を有すべき部材には不向きである。

適用例として、定期的交換を前提とした部材である支承や伸縮装置が上げられ、本システムでも本方式を採用している。

(2) 劣化予測式（理論式）

劣化メカニズムに応じた理論的予測式を使用する方法であり、工学的説明性が明白である。しかし、個々の橋梁は架設環境や材料特性、現在までに受けてきた作用等の履歴も異なる中、これらを全てパラメータとして予測式に取り込むことは不可能であり、ここに適合性の限界がある。また、理論式とは言え、通常は統計処理した結果を一つの確定式としているものがほとんどである。すなわち、統計的にある程度の量が集まった平均としてはある確からしさを有しているものの、個々についてはばらつきがあり、このばらつきを考慮することは不可能である。

適用例として、劣化要因が比較的明白であるコンクリートの塩害やコンクリート床版の疲労が上げられ、本システムでも本方式を採用している。

確定式にばらつきがあることを、コンクリートの塩害による劣化予測式として、本システムで採用しているコンクリート中の塩化物イオン量を推計する際に用いている飛来塩分量を例として示す。文献1)の調査結果として、全国の沿岸部 266 地点における3年間の年平均飛来塩分量調査から図-1.3.1 が得られている。これを基礎資料の一つとして後述の3.1.2で記載の「飛来塩分量： $C_{air} = C_1 \cdot d^{-0.6}$ 」が導き出されており、傾きである「-0.6」は全地区での回帰式から、「1 km 換算飛来塩分量： C_1 」はこれらを3地域区分に包括して決められている。また、飛来塩分量と同時に調査された76地点でのコンクリートブロックの暴露試験結果から、図-1.3.2 が得られている。これを基礎資料の一つとして「コンクリート表面における塩化物イオン濃度： $C_o = 1.2 \cdot C_{air}^{0.4}$ 」が回帰式から導き出されている（同図中の表-3.2のaとb）。このように、本来はある幅を持ったものを平均的な一つの確定値に集約させた予測式であることを理解しておくことが重要である。

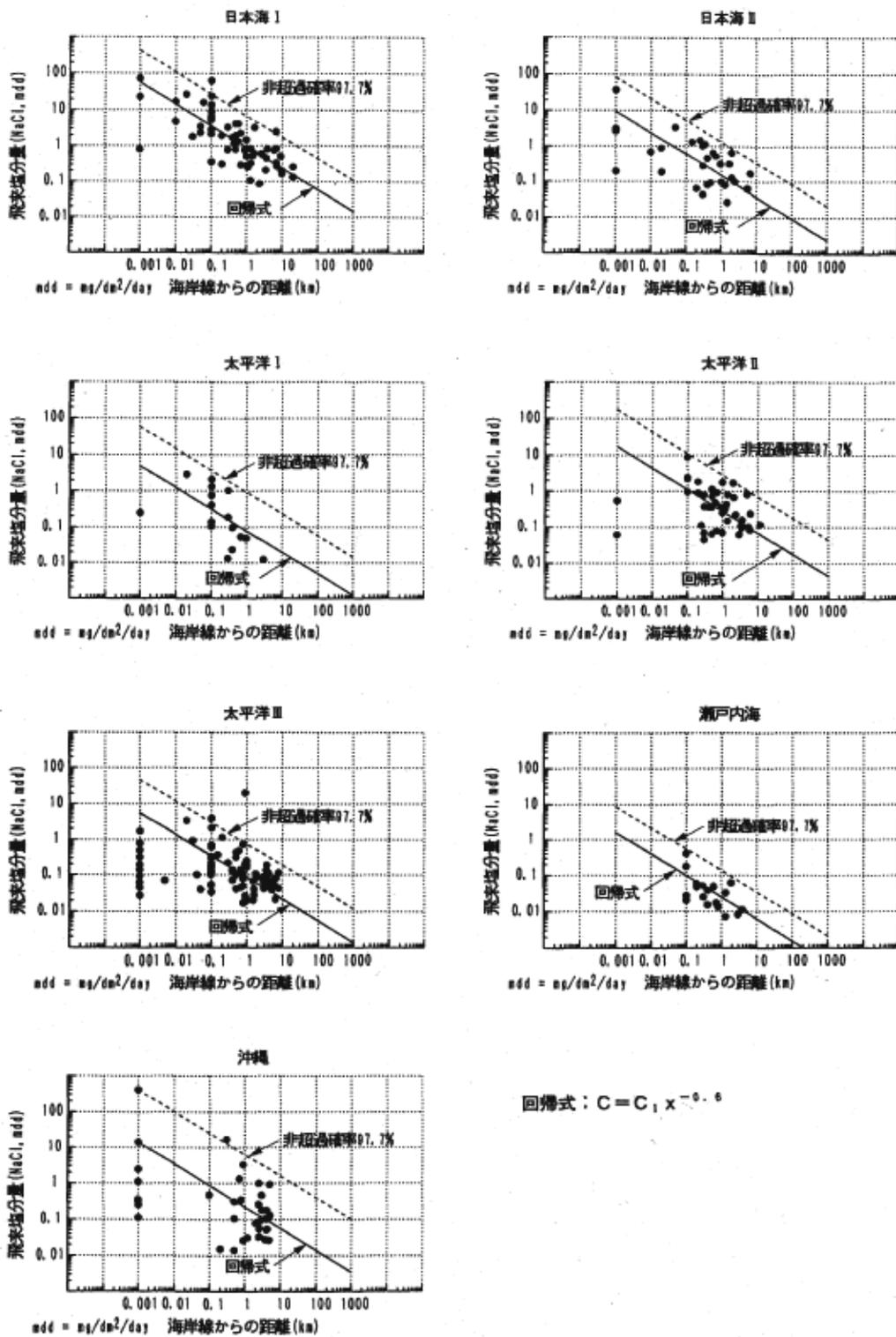


図-2.7 大区分での飛来塩分量と海岸線からの距離の関係

図-1.3.1 飛来塩分量と海岸線からの距離の関係 1)

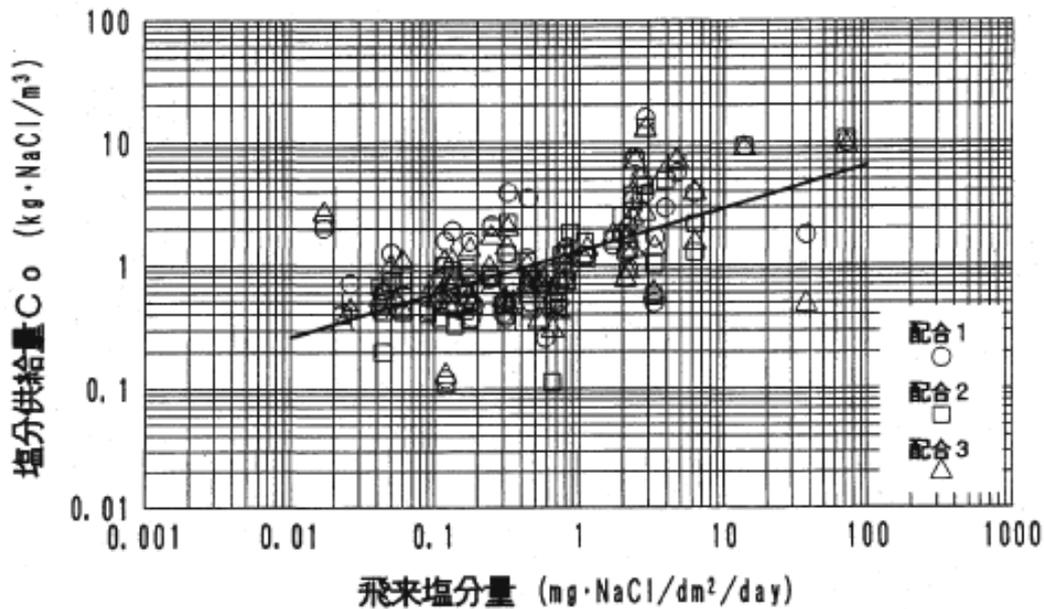


図-3.4 塩分供給量 C_o と飛来塩分量の関係

表-3.2 塩分供給量 C_o と飛来塩分量の相関

	a	b	相関係数	データ数
配合1	1.409	0.337	0.616	69
配合2	1.324	0.408	0.666	67
配合3	1.237	0.307	0.585	69
全データ	1.319	0.349	0.621	205

$$C_o = a x^b$$

C_o : 塩分供給量 (kg・NaCl/m³)

x : 飛来塩分量平均値 (NaCl, mdd)

図-1.3.2 塩分供給量と飛来塩分量の関係¹⁾

(3) 点検結果の統計分析

点検結果に対応する健全度と経過年の関係を統計分析した直線又は曲線の予測式を使用する方法であり、点検結果である実態に基づくという利点がある。しかし、上記(2)と同様、平均的な値であり、ばらつきは考慮できない。ばらつきの例としては、後述の図-3.3.3～図-3.3.5が上げられる。部材毎、劣化要因毎に、環境条件や架設年等でカテゴリー区分した予測式を作成することも可能ではあるものの、架設環境や材料特性、現在までに受けてきた作用等の履歴を厳密に区分することは至難であり、また細分するほどデータ数が減少して分析不可能となる。

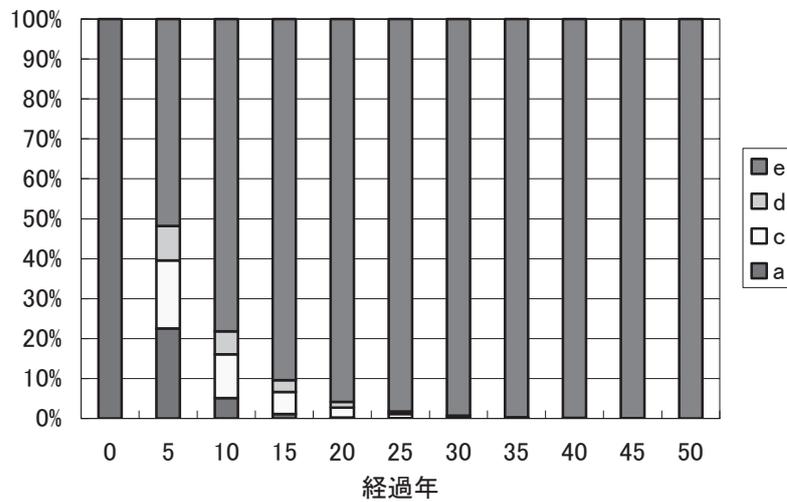
適用例として、点検結果が統計処理できるまでに揃っている鋼部材の防食機能の劣化や腐食が上げられ、本システムでも本方式を採用している。

(4) 遷移確率

各健全度ランク間の遷移確率を用いて、各健全度ランクの比率の推移をマルコフ過程により求める方法である。例として、直轄道路橋の2回の定期点検結果の分析から求めた塗装の劣化の遷移確率を図-1.3.3に示す。これは、最初の母集団のうち、ある時期にある健全度に低下するものの割合が0%になっているかを示すものであり、母集団の中での遷移割合を示すものであることから、個々の橋梁には適用できない。

適用例として、前述のマクロマネジメントの全体を推定する場合の例とした米国のpontisが上げられる。

鋼主桁、防食機能の劣化(A、B塗装系)



鋼主桁、防食機能の劣化(C塗装系)

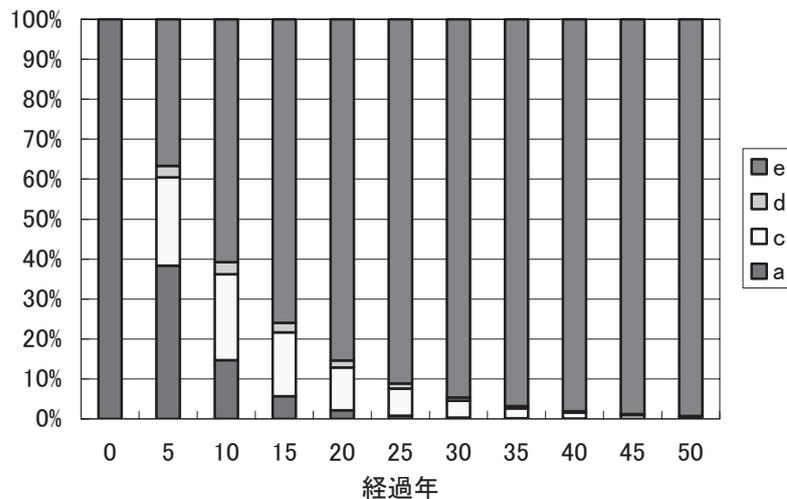


図-1.3.3 塗装の劣化の遷移確率

1. 3. 3 橋梁の健全度を予測する対象

橋梁の健全度予測では、橋梁の構成部材単位、損傷要因単位で行う方法が用いられることが多い。これは、損傷要因毎に劣化機能が異なることに加え、仮に橋梁全体の健全度として予測を行った場合、橋梁の更新といった橋梁単位の大規模な補修・補強の時期しか予測することができないためである。一方、単位をいたずらに細分したとしても、前述の予測精度の課題があり、予測コストも増大する。このように、目的に応じた必要な単位やレベルで健全度の予測を行う対象を設定する必要がある。

1. 3. 4 橋梁の現状評価

アセットマネジメントにおいて、劣化予測や補修・補強の実施時期を決定する上で最も基本となるのが、構造物の健全度の現状評価である。現状評価においては、定量的かつ詳細な構造物に関するデータが必要となる。

現状評価に際して最も基本的で重要であるのが、橋梁の点検結果である。点検は、その目的に応じて適切な方法で実施し記録しておく必要がある。

現在、国土交通省では、従前使用していた「橋梁点検要領(案)」²⁾ (以下「S63 定期点検」という。)を平成 16 年に改訂した「橋梁定期点検要領 (案)」³⁾ (以下「H16 定期点検」という。また、両者を区分しない場合は「定期点検」という。)に基づいて、表-1.3.2 に示すとおり、橋梁を構成する部位・部材に対して発生する損傷の種類を定め、5 年に 1 度の割合で定期点検を実施している。

通常、点検には損傷の有無やその程度などの現状に関する客観的事実としてのデータの取得以外に、それらを基にした橋の機能状態などの性能や健全性についての一次的な評価を行うことを含める場合が多い。

点検で把握される損傷や劣化などの客観的事実としてのデータは、損傷の原因推定や現在の性能評価に不可欠である以外に、継続的に把握することで将来予測や傾向分析等にも活用される。統計処理や定量的予測に用いるには、点検者の主観などに左右されず、経年的にも相対比較が可能な統一の基準に基づく客観的データであることも重要となる。

一方、橋の機能状態などの一次診断は、必ずしも全ての橋の状態を実際に確認することも、損傷等の事実関係から橋の性能への影響を適切に判断するだけの専門的な技術力をもたない管理者にとっては、通行規制や補修・補強等の措置に関する適切な意思決定を行うための行動を起こすために極めて重要な意味を持つ。すなわち、個々の損傷の種類や進行程度などの事実以外に、損傷が橋の機能状態に及ぼしている影響やそれを踏まえて実施すべき対応の考え方に関わる所見を得てはじめて、管理者はさらなる詳細調査を行うなどの対応をとることが可能となるのであり、一次診断で問題がないとされた場合、必ずしも専門的知見を有さない管理者にとって、その結果に疑いを持つことは極めて困難である。

このような考え方から、国総研では、既往の点検結果とその活用に関する課題などの分析を行い、損傷の大きさなどの客観的事実を「損傷程度の評価」として記録すると同時に、適当な技術者によって橋や構造の機能状態に関する一次的診断として「対策区分の判定」の評価を行うべきことを、さらにその評価体系は既往の点検データが無駄にならないよう新旧対応がとれることに配慮すべきことを提案した。図-1.3.4 に評価体系の改訂内容を示す。これにより、現在、直轄道路橋については、S63 定期点検にもとづく点検データを H16 定

期点検の評価体系に置き換えたデータと、平成 16 年度から H16 定期点検に基づいて取得されつつあるデータが、比較・分析可能な形でデータベースに蓄積されつつある。

点検データの取得単位については、今後点検の合理化の検討等に用いる基礎データともなるため、現在のところできるだけ細分化したものとなっている。すなわち、客観的事実としての損傷の程度についてのデータは、原則全部材を対象とし、一つの部材をその構造に応じて更に細分化した小さな要素単位で評価している。一方、健全性などの一次評価である対策区分の判定は、部材や橋の機能等の状態を評価する性質上、部材単位以上に細分化することは適切でない。一方、複数の部材を組み合わせた大きな構造単位や橋全体の機能状態を外観目視に頼る定期点検で得られている情報だけから総括することは、信頼性の点で問題があることが既往の点検結果の再評価によって明らかであった。そのための機能状態等の性能との関わりにおける対策等についての定性的評価による管理者への助言としての対策区分の判定では、主桁や橋脚といった部材単位での評価を行うことを基本とした。

本システムにおける劣化予測では、客観的評価である「損傷程度の評価」を用いている。これは、上述に加え、「対策区分の判定」には重要度等の部材の重みや橋梁検査員の知識に基づく今後の劣化見込みなどの技術的判断が加味されたものであり、既にある程度の将来予測も含んだ評価となっているためである。

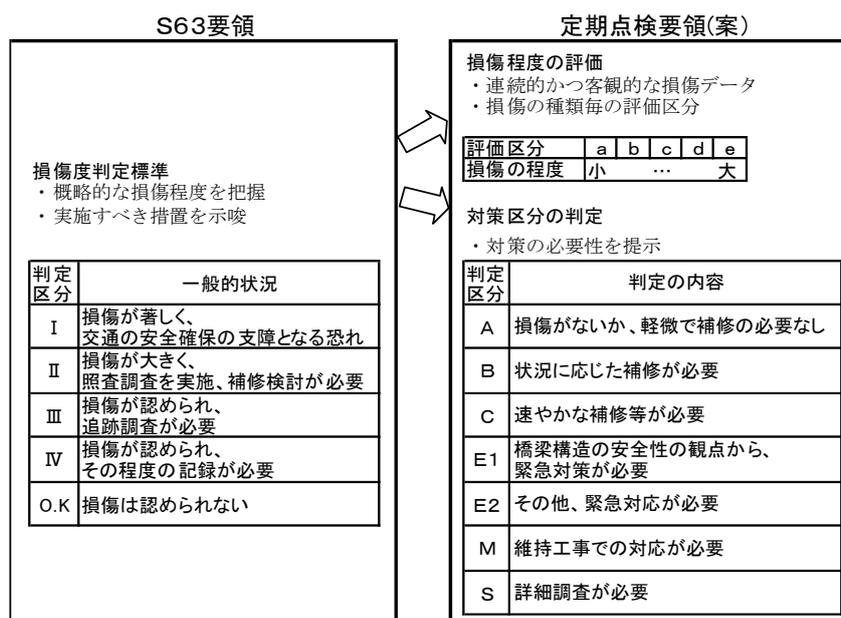


図-1.3.4 損傷の評価体系の改訂内容^{2), 3)}

表-1.3.2(a) 定期点検の対象部材及び損傷³⁾

部位・部材区分		損傷の種類			
		鋼	コンクリート	その他	
上部構造	主桁	腐食 亀裂	ひびわれ 剥離・鉄筋露出 漏水・遊離石灰 抜け落ち		
	横桁	ゆるみ・脱落 破断	コンクリート補強材の損傷 床版ひびわれ うき		
	縦桁	防食機能の劣化 遊間の異常	遊間の異常 定着部の異常 変色・劣化		
	床板	定着部の異常 漏水・滞水	漏水・滞水 異常な音・振動 異常なたわみ 変形・欠損		
	対傾構	異常な音・振動 異常なたわみ			
	横構	上横構	変形・欠損		-
		下横構			
	主構トラス	上・下弦材			
		斜材、垂直材			
		橋門構			
	アーチ	アーチリブ		ひびわれ 剥離・鉄筋露出 漏水・遊離石灰 抜け落ち コンクリート補強材の損傷 床版ひびわれ うき 遊間の異常 定着部の異常 変色・劣化 漏水・滞水 異常な音・振動 異常なたわみ 変形・欠損	
		補剛桁			
		吊り材			
		支柱			
		橋門構			
	ラーメン	主構（主桁）			
		主構（脚）			
	斜張橋	斜材			
		塔柱			
		塔部水平材			
塔部斜材					
外ケーブル					

表-1.3.2(b) 定期点検の対象部材及び損傷³⁾

部位・部材区分			損傷の種類		
			鋼	コンクリート	その他
下部構造	橋脚	柱部・壁部	腐食 亀裂 ゆるみ、脱落 破断 防食機能の劣化 異常な音・振動 異常なたわみ 変形・欠損	ひびわれ 剥離・鉄筋露出 漏水・遊離石灰 ^⑩ コン クリート補強材の 損傷 うき 定着部の異常 変色・劣化 漏水・滞水 異常な音・振動 異常なたわみ 変形・欠損	-
		梁部			
		隅各部・接合部			
	橋台	胸壁	-	ひびわれ 剥離・鉄筋露出 漏水・遊離石灰 ^⑩ コン クリート補強材の 損傷 うき 定着部の異常 変色・劣化 漏水・滞水 異常な音・振動 異常なたわみ 変形・欠損	-
		縦壁			
		翼壁			
	基礎			-	沈下・移動・傾斜 洗掘
その他					
支承部	支承本体		腐食 亀裂 ゆるみ・脱落 破断 防食機能の劣化 支承の機能障害 漏水・滞水 変形・欠損 土砂詰り 沈下・移動・傾斜	-	破断 支承の機能 障害 変色・劣化 漏水・滞水 変形・欠損 土砂詰り
	アンカーボルト		腐食 亀裂 ゆるみ・脱落 破断 変形・欠損	-	-
	落橋防止システム		腐食 亀裂 ゆるみ・脱落 破断 防食機能の劣化 異常な音・振動 異常なたわみ 変形・欠損	ひびわれ 剥離・鉄筋露出 漏水・遊離石灰 うき 変色・劣化 異常な音・振動 異常なたわみ 変形・欠損 土砂詰り	-
	沓座モルタル		-	ひびわれ うき 変形・欠損	-
	台座コンクリート				
その他					

表-1.3.2(c) 定期点検の対象部材及び損傷³⁾

部位・部材区分		損傷の種類		
		鋼	コンクリート	その他
路上	高欄	腐食 亀裂 ゆるみ・脱落 破断 防食機能の劣化 変形・欠損	ひびわれ 剥離・鉄筋露出 漏水・遊離石灰 うき 変色・劣化 変形・欠損	-
	防護柵			
	地覆			
	中央分離帯			
	伸縮装置	腐食 亀裂 ゆるみ・脱落 破断 防食機能の劣化 遊間の異常 路面の凹凸 変形・欠損 土砂詰り	-	遊間の異常 路面の凹凸 変色・劣化 漏水・滞水 異常な音・振動 変形・欠損 土砂詰り
	遮音施設	腐食 亀裂 ゆるみ・脱落 破断 防食機能の劣化 変色・劣化 変形・欠損	-	-
	縁石	-	ひびわれ 剥離・鉄筋露出 漏水・遊離石灰 うき 変色・劣化 変形・欠損	-
	舗装	-	-	路面の凹凸 舗装の異常
排水施設	排水ます	腐食 破断 防食機能の劣化 変色・劣化	-	破断 変色・劣化 漏水・滞水 変形・欠損 土砂詰り
	配水管	漏水・滞水 変形・欠損 土砂詰り		
	その他			
点検施設	腐食 亀裂 ゆるみ・脱落 破断 防食機能の劣化 異常な音・振動 異常なたわみ 変形・欠損	-	-	
添架物	腐食 亀裂 ゆるみ・脱落 破断 防食機能の劣化 異常な音・振動 異常なたわみ 変形・欠損	-	-	
袖擁壁	-	ひびわれ 剥離・鉄筋露出 漏水・遊離石灰 変色・劣化 変形・欠損 沈下・移動・傾斜	-	

参考文献

- 1) 飛来塩分量全国調査 (IV) 一飛来塩分量の分布特性と風の関係一、土木研究所資料第 3175 号、平成 5 年 3 月
- 2) 橋梁点検要領(案)、土木研究所資料第 2651 号、昭和 63 年 7 月
- 3) 橋梁定期点検要領(案)、国道・防災課、平成 16 年 3 月