

道路構造物のライフサイクルについて

平成 16 年 7 月

(財)道路保全技術センター

1 . 橋梁のライフサイクルに関する既往の文献

(1) コンクリート橋の劣化予測について (出典 : 道路構造物の今後の管理・更新のあり方提言(平成 15 年 4 月))

・コンクリート橋における劣化予測

コンクリート橋における、一般的な劣化原因としては、塩害、中性化、凍害、化学的侵食、アルカリ骨材反応、疲労、過大荷重などが考えられる。その中で、劣化への影響が最も大きいのは塩害であるため、今回はまず最初として塩害に着目した劣化予測を実施する。

・コンクリート橋における塩害による劣化予測

1.劣化予測の考え方

塩害による劣化予測は、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の長さを予測することを基本とし、塩化物イオンの拡散と鋼材腐食の進行を対象とする。予測の方法は、「2001年制定 コンクリート標準示方書 [維持管理編], 平成 13 年 1 月 : (社) 土木学会」を準用する。

解説 表14.2.1 各劣化期間の定義

劣化過程	定 義	期間を決定する主要因
潜伏期	鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度*に達するまでの期間	塩化物イオンの拡散 初期含有塩化物イオン濃度
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	鋼材の腐食速度
加速期	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期	腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間	の腐食速度

注) 腐食発生限界濃度は、平成 11 年度版コンクリート標準示方書 [施工編] において標準値を 1.2kg/m³ と定めている。

しかし、施工編で定めた標準値は、設計用の安全側の値である。実際には、分散状況を考慮することが望ましく、その値を 0.6kg/m³ とすると 1.2kg/m³ から 2.4kg/m³ となる。

よって、今回の劣化予測にあたっては、平均値としての 1.8kg/m³ を腐食発生限界濃度とする。

2.劣化予測の方法

1) 潜伏期における劣化予測式

塩化物イオンの拡散方程式：フィックの第 2 法則

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (\text{解 } 14.2.1)$$

ここに、 C : 液相の塩化物イオン濃度
D_c : 塩化物イオンの拡散係数
x : コンクリート表面からの距離
t : 時間

鋼材位置における塩化物イオン濃度

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) + C(x, 0) \quad (\text{解 } 14.2.3)$$

ここに、 C(x, 0) : 初期含有塩化物イオン濃度(kg/m³)

D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (普通ポルトランドセメントを使用した場合)
log D = [-3.9(W/C)² + 7.2(W/C) - 2.5] (解 6.4.2)

* 拡散係数は、2002 年制定 コンクリート標準示方書 [施工編] に準拠する。
ここに、W/C : 水セメント比

C₀ : 表面における塩化物イオン濃度(kg/m³)

飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
	汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

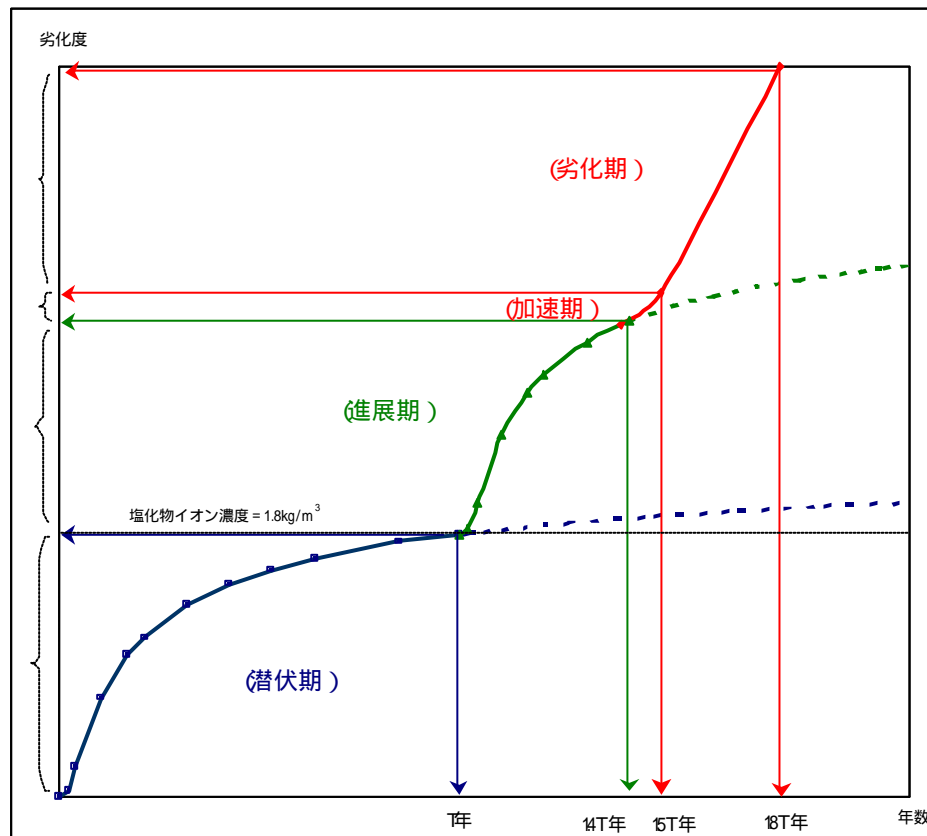
2) 鋼材腐食の進行予測

鋼材腐食の進行予測は、塩化物イオン拡散の予測結果に関連させ、各劣化期間を以下のように想定する。

劣化過程	定義	劣化期間
潜伏期	鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達するまでの期間	T
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひびわれ発生までの期間	Tの0.4倍
加速期	腐食ひびわれ発生により腐食速度が増大する期間	Tの1/10
劣化期	腐食量の増加により耐力力の低下が顕著な期間	Tの0.3倍

- * 潜伏期における劣化期間は、式（解 14.2.3）で塩化物イオン濃度が 1.8kg/m^3 となるまでの期間(T)とする。
- * 鋼材腐食の進行である進展期の劣化期間は、Tの0.4倍と想定する。
- * 補修・補強を前提とした加速期の劣化期間は、Tの1/10と想定する。
- * 更新（架替）を前提とした劣化期の劣化期間は、Tの0.3倍と想定する。
- * 以上の劣化期間の想定は、現時点において根拠がないため、今後の研究が必要である。

【塩害による劣化曲線のイメージ】



・ 将来の補修費用の試算例

1. 補修費用の試算の条件

塩害による劣化曲線を踏まえ、ある劣化度の段階において補修対策を施した場合の将来費用の試算を実施する。将来費用の試算の条件を以下に示す。

- 補修対策実施 : 劣化度 から へ進行した直後
- 補修対策実施期間 : 2002 年度現在から 2022 年度までの 21 年間
- 試算する補修工法 : 断面修復工法、または電気防食工法
- 補修工法の工事費 : 主桁構造別に示す (事業費)

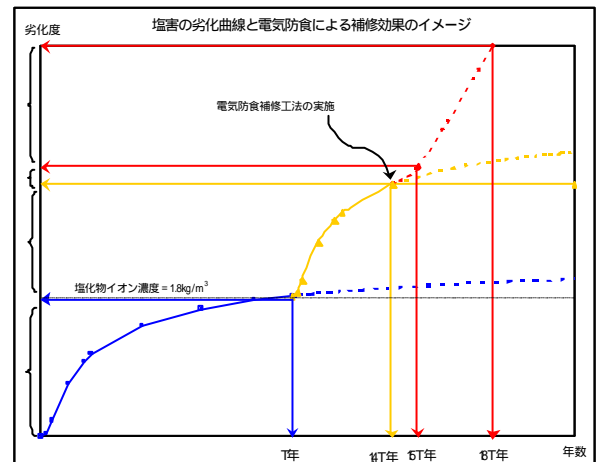
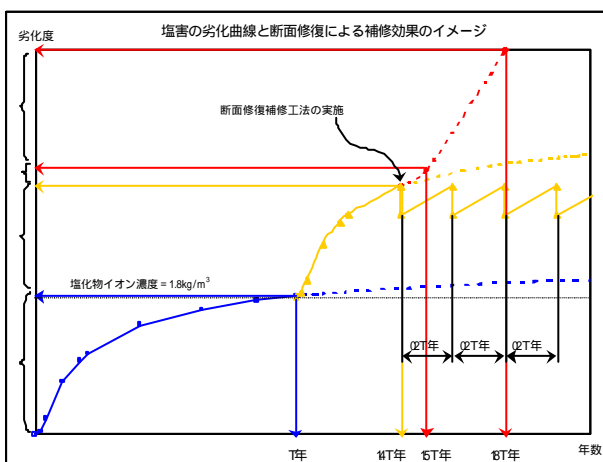
主桁構造	R C 桁	P C プレテン桁	P C ホーストン桁
想定した支間長	15.0m	20.0m	30.0m
断面修復工法	300万円/本	1,200万円/本	700万円/本
電気防食工法	1,200万円/本	5,800万円/本	2,500万円/本

- * 補修対策実施の時期は、桁の変状が明らかになる劣化度 の時期とする。将来費用の試算にあたって、劣化度 から へ進行した直後の年度の主桁主構本数に対して実施する。
- * 加速期にあたる劣化度 の場合の補修工法は、実績が多い断面修復および電気防食工法とする。
- * 電気防食工法において外部から電源を使用する方式の場合、工事完成以降、維持管理費として電気代が必要となるが、工事費に対して占める割合が小さいことより無視する。

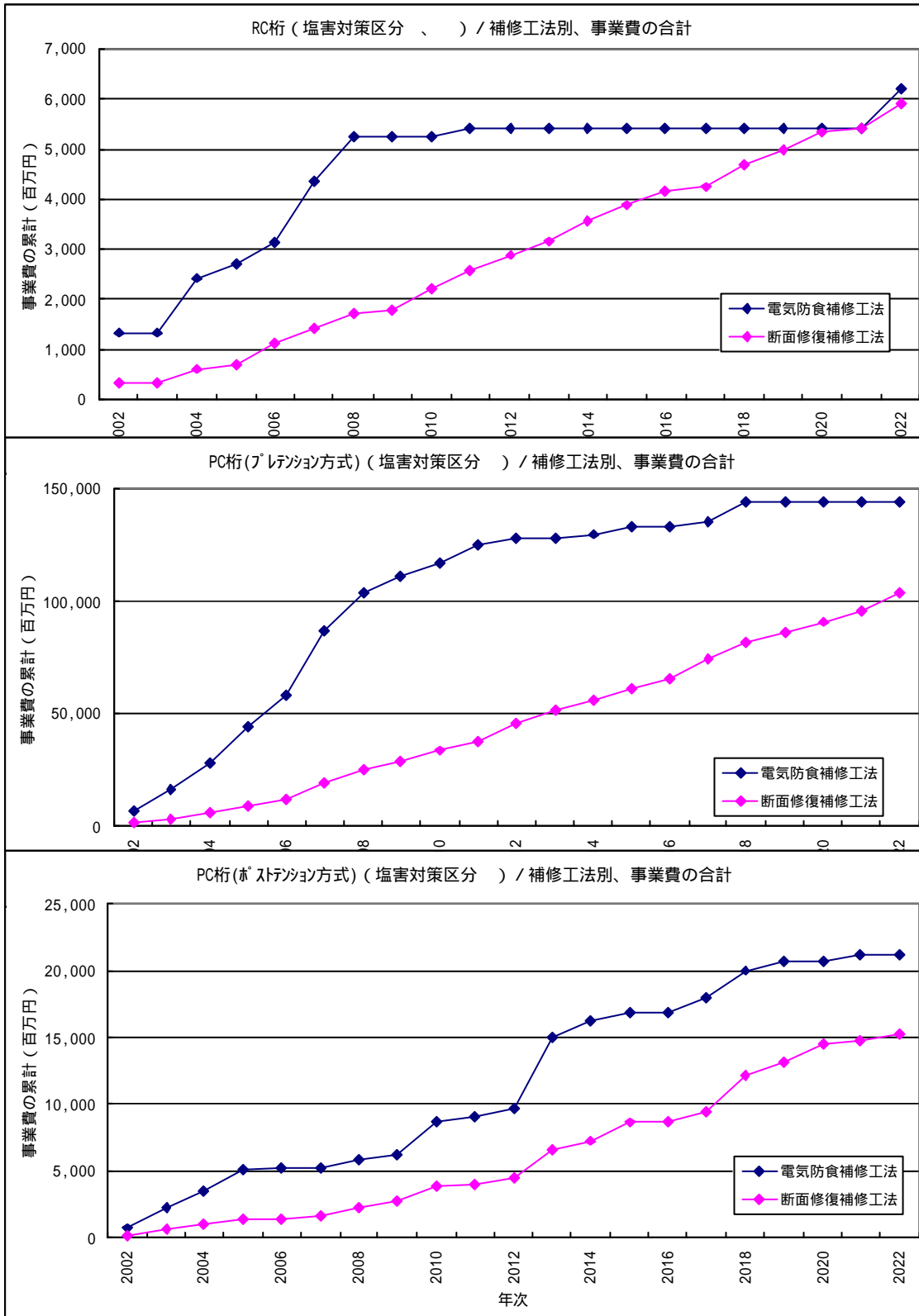
2. 塩害による劣化予測曲線と補修効果のイメージ

塩害による劣化予測曲線と、断面修復および電気防食工法による補修効果のイメージを示す。それぞれの補修工法について、補修効果の特長を以下に示す。

- ・ 断面修復工法
 - 対策実施により、劣化度はある程度回復する。
 - 対策実施後、潜伏期の劣化期間 : T の 0.2 倍の供用期間で劣化度は再び に戻ると想定する。
 - 0.2 T の供用期間後、劣化度 となるため、再度補修工を実施する。
- ・ 電気防食工法
 - 対策実施により、劣化度は進行しないが、回復もしない。



将来の補修費用の試算結果例



2) 鋼橋の基本ライフサイクルについて (出典：道路構造物の今後の管理・更新のあり方提言(平成 15 年 4 月))

1. 代表的橋梁の選出

- 基本データ (道路統計年報 2001 による)
 - 2000 年 4 月 1 日現在、(橋長 15m 以上)、()内直轄管理区間
 - 道路橋総数 138,672 (9,920)
 - 総延長 8,180km (1,071km)
 - 平均橋長 71m (126m)
 - 桁橋の比率 78% (83%)
- ☆桁橋を代表として扱うことが適当

2. 寿命の推定

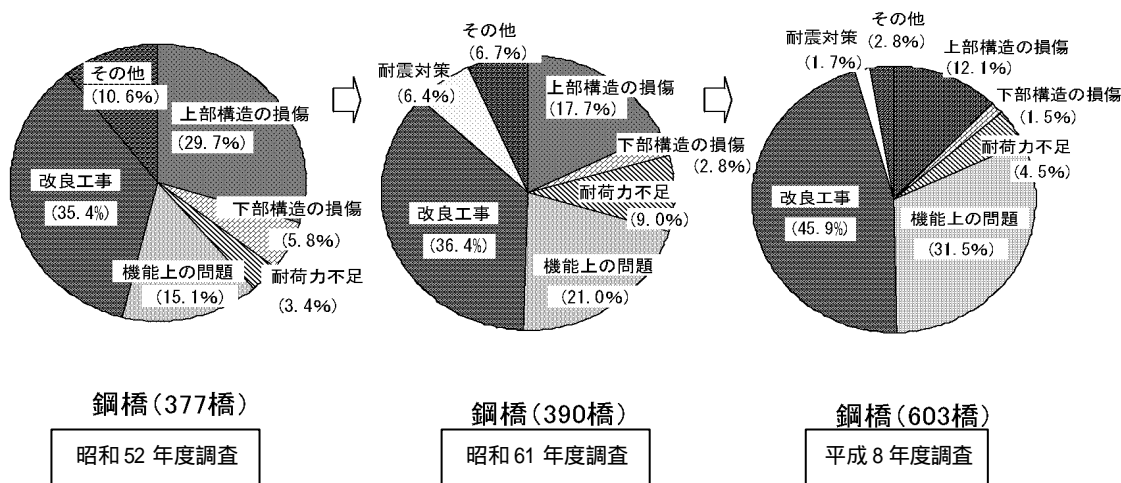
(1) 既存のデータ (図-1)

- 鋼橋の架替えに至る供用年数及び架替え理由に関するデータ (土研資料 3512 号：橋梁の架け替えに関する調査結果Ⅲ)
- 土研及び建設省にて、S42, S52, S61, H8 年において、過去約 10 年間に架け替えられた橋の調査を実施
- それぞれ、436 *, 1545, 1691, 1923 橋が対象(*2 年間のデータ)

(2) 架替えに至る主たる原因

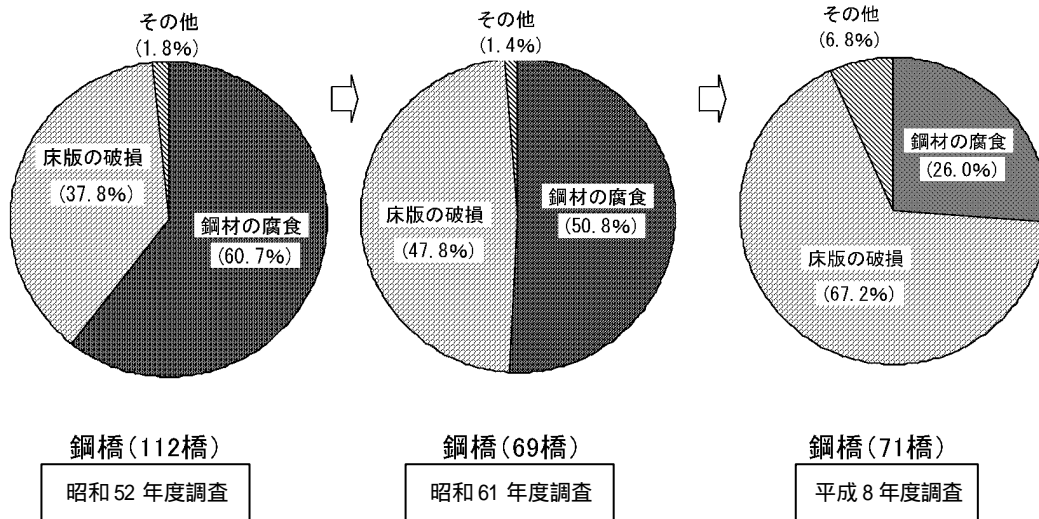
- 架替え理由の大半は道路改良等、陳腐化によるものであり、上下部構造の損傷に起因するものは、調査年次ごとに比率は減少
- 上下部構造の損傷による架替えの比率：35.5%→20.5%→13.6%
- 大半 (8, 9 割) が上部構造の損傷

☆橋の寿命が延びたとも考えられるが、他の要因もあり有意性は疑問



- 上部構造の損傷のほとんどは鋼材の腐食と RC 床版の損傷
- 鋼材の腐食 60.7%→50.8%→26.0%
- RC 床版の損傷 37.5%→47.8%→67.2%

☆腐食の減少は維持管理(塗装)レベルの向上、RC 床版損傷の増加は設計・品質低下・重車両が要因と推定 (但し、S60 以降の RC 床版は高耐久性、単純に増加することは予想されない)



- 鋼部材の疲労が主たる架替え要因とはいえない
日経サイエンス 1993 5 「米国の橋はなぜ落ちる」:
一日の交通量と欠陥橋梁の間には逆比例の関係、保守管理の欠落こそが
荒廃の最大要因

(3) 寿命設定の根拠 その1

- 損傷による架替えのピークは常に2箇所に見られ、調査年次に従って伸張 (図-1)
第1のピーク 15 → 20 → 25 → 35年 (架替え要因によらず)
第2のピーク 35 → 40 → 50 → 60年 (")
 - 上部構造の損傷に起因するもののデータに限っても傾向は変わらず(図-2)
 - 第2のピークは戦前、第1のピークは戦後の橋に対応とも考えられる。
 - しかし、最近のデータは、実際に問題になっている橋と符合
- ☆短命橋約30年、平均的な寿命の橋約60程度とすることにやや説得性あり。

(4) 供用年数別架替累積比率

- 二つのデータ (S60頃とH8頃の調査) (図-3)
- 単純に架替率5%、50%になる年数を拾うとそれぞれ、
5% 20 → 50年
50% 42 → 64年
となる。(但し、すべての要因による架替データが含まれる)

3. ライフサイクルのシナリオ

- 基本的に鋼材の腐食と床版の損傷を2大架替え要因とし、その他の損傷要因は捨象する。
- 疲労によって寿命が支配されるのは、初期故障 (2次応力疲労を含む) の対処が十全に行われた場合に限定される (本来の寿命)。

シナリオA = 5% : 寿命30年

<従来型設計+施工、対症療法的維持管理すら十分に行われない場合>

シナリオB = 50% : 寿命60年

<従来型設計+施工、従来型対症療法的維持管理>

シナリオC = 95% : 寿命120年 or longer

<耐久性設計+リスク管理的維持管理* >

- * Risk Management : 壊さない設計
- Damage Control : 壊れるモード、部位を限定
- Trouble Shooting : 未知の変状が発見→原因究明、本質的対処、情報共有、FB

4. パフォーマンス曲線(案)

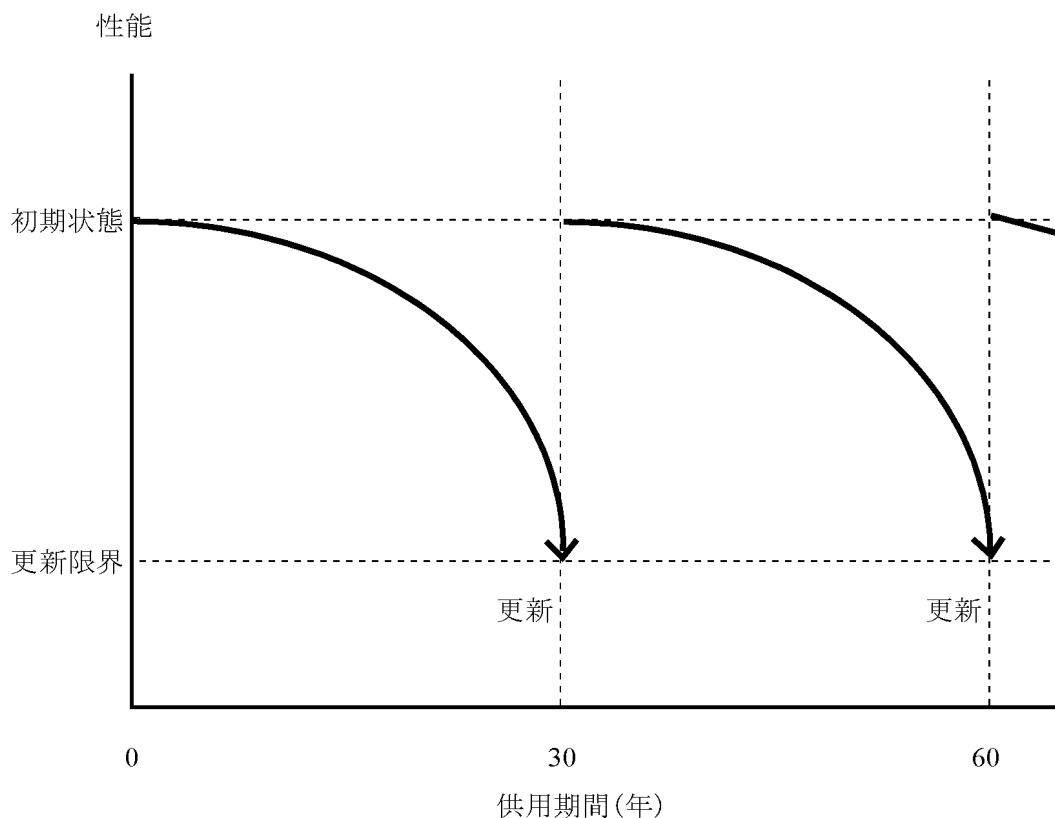
舗装や鋼桁の塗装のように、比較的単純なものであれば2次元の劣化曲線は意味を持つが、多くの要因により決定される橋全体のパフォーマンスを一軸で表現することは不可能。

だからといって、複雑な表記方法は、解りにくいものになってしまう。そこで以下のように単純化した表記を試みることにした。

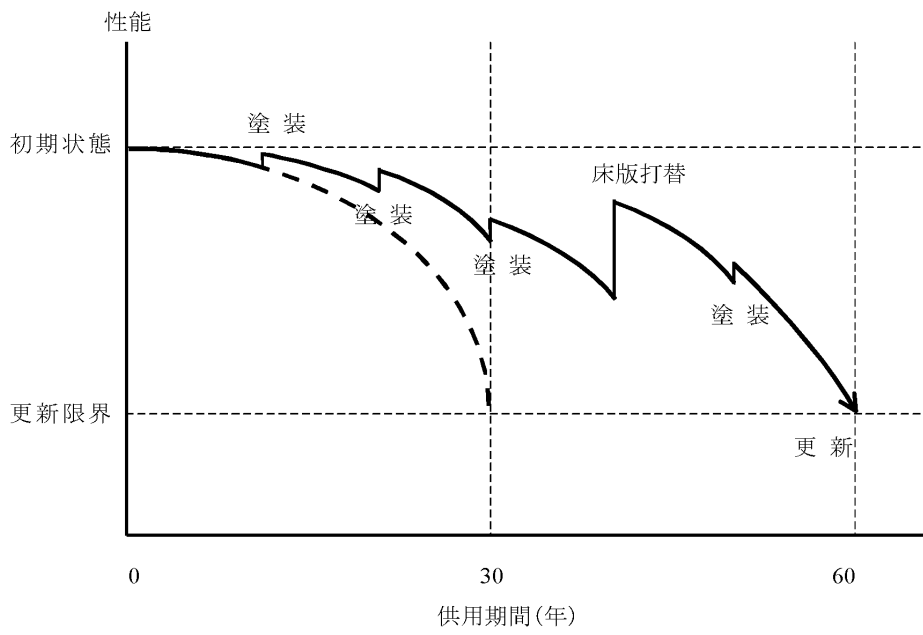
- ・縦軸は象徴的な意味での性能(パフォーマンス)を表し、初期レベルと更新レベルのみを表示。
- ・横軸は時間(供用年数)とする。累積大型車交通量や飛来塩分量とする考え方もあるが、橋梁群一般を対象とするときには、更新の要因が複数にわたるので、時間を主、他の要因を従とするのが適切。
- ・劣化曲線は上に凸な曲線で表し、縦軸上の始点から設定した寿命と縦軸の更新レベルがクロスする点に単純減少で向かう。縦軸が象徴的であるので、曲線の詳細な形状は意味を持たない。寿命の設定のみが重要である。
- ・5%、50%、95%それぞれの劣化 Vs.維持管理シナリオを曲線上に象徴的に表示する。

☆以下の図を参照しながら、維持管理の改善、技術開発の促進を行うことで、シナリオ A から B, B から C へのシフトが可能。これにより、将来の維持管理負担を軽減

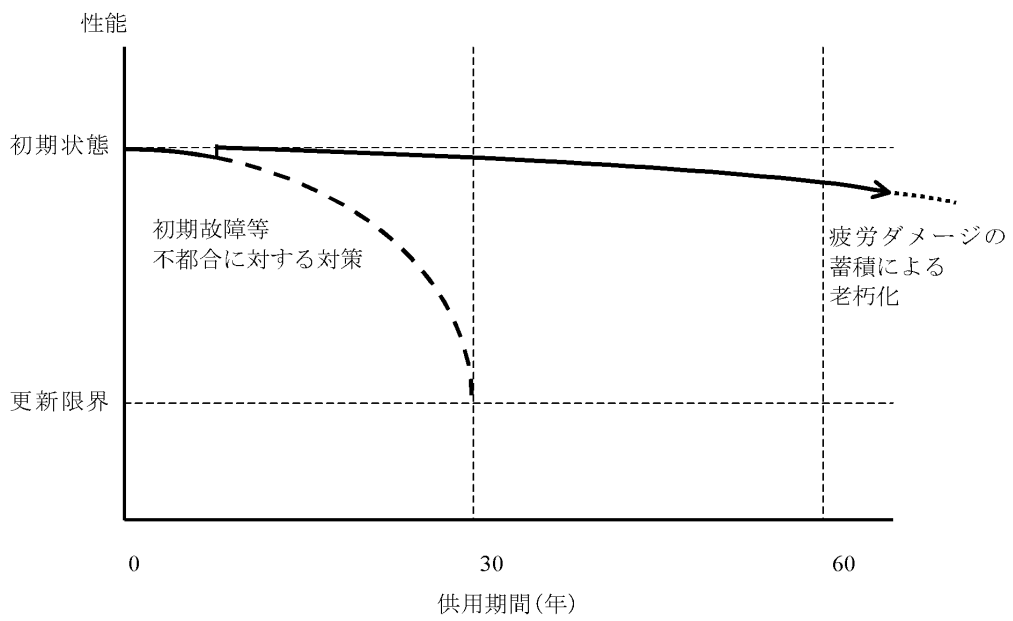
シナリオ A



シナリオB



シナリオC



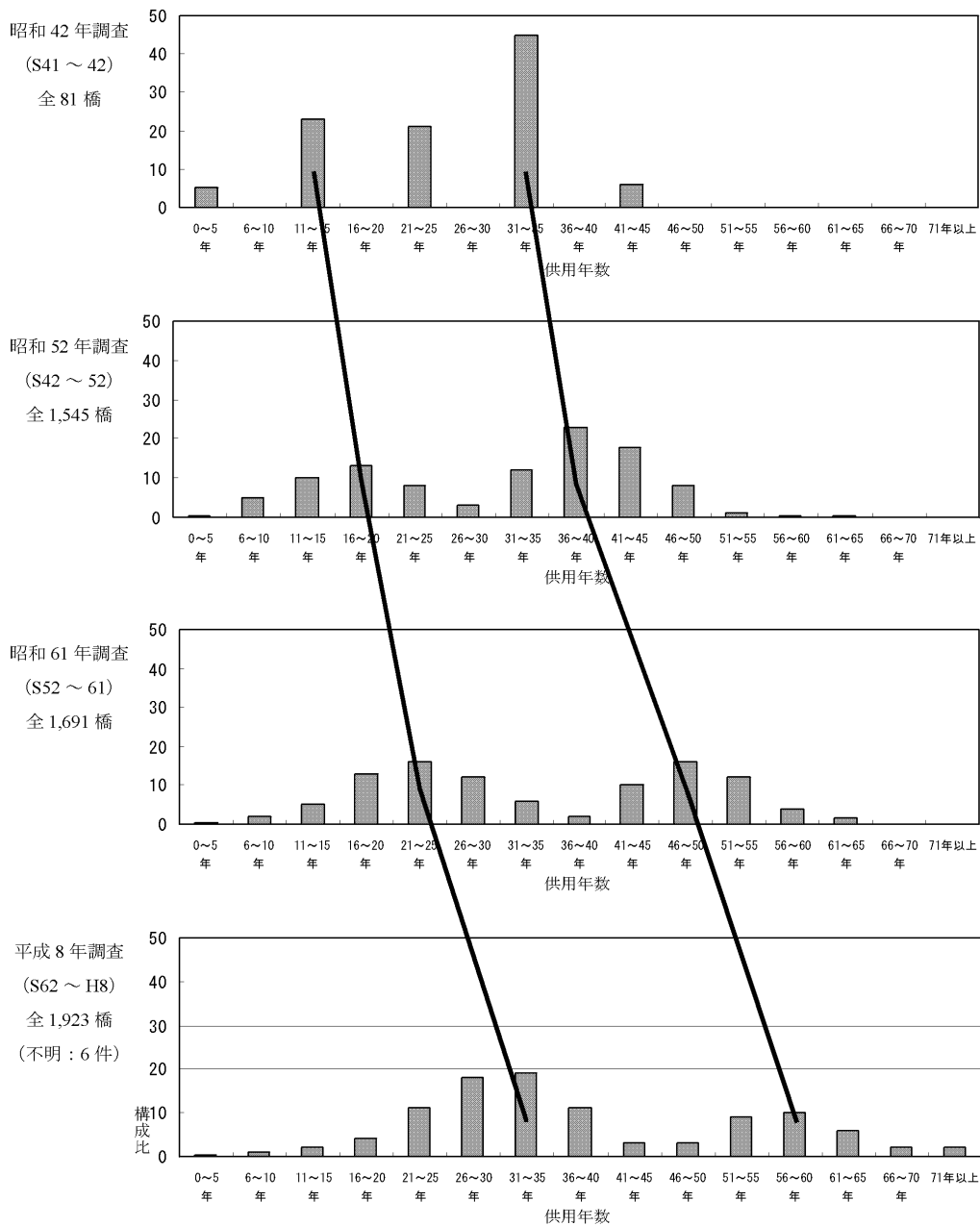
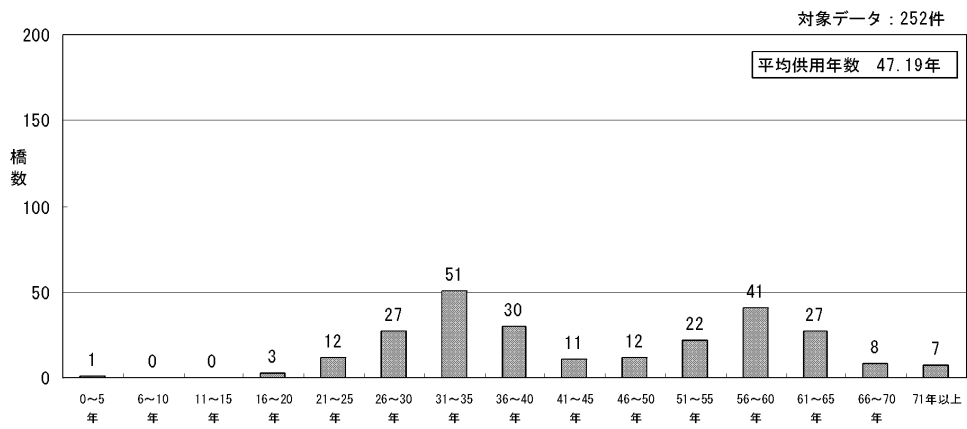
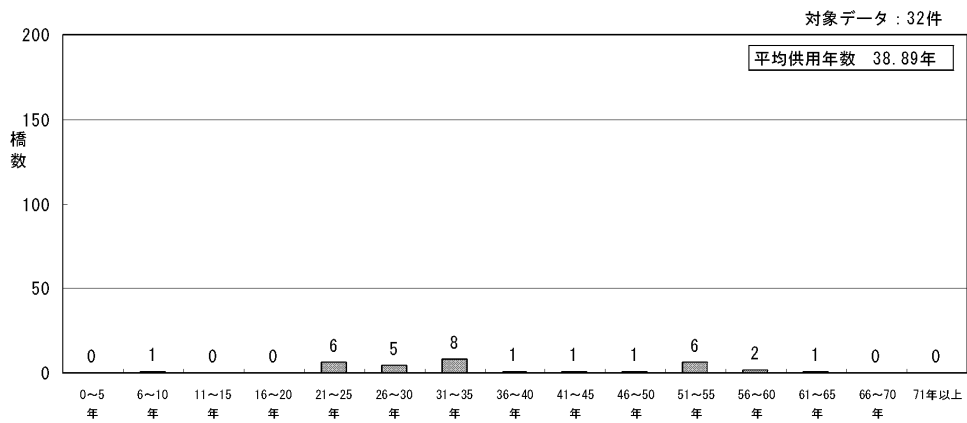


図-1 調査年次ごとの架替橋梁の供用年数(土研資料3512号)

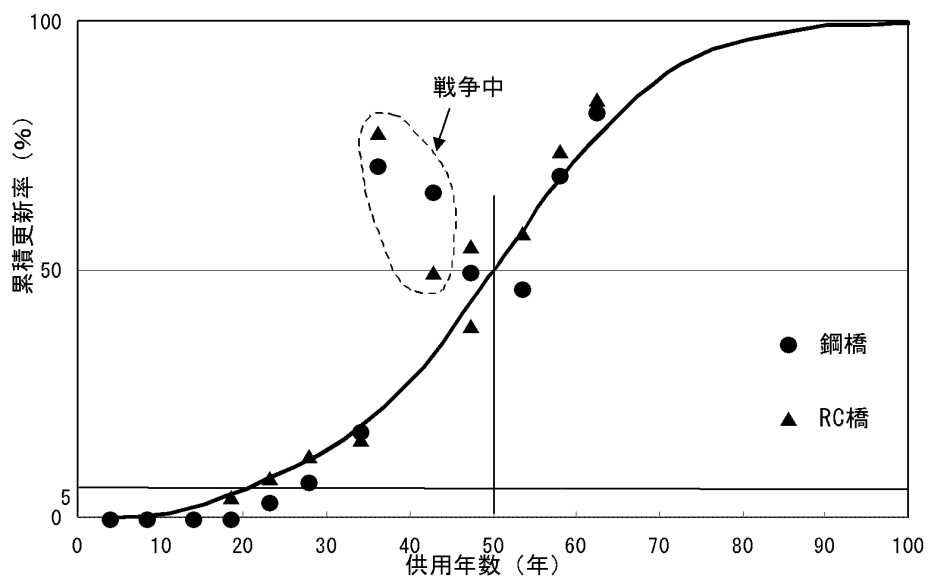


(a) 上部構造損傷

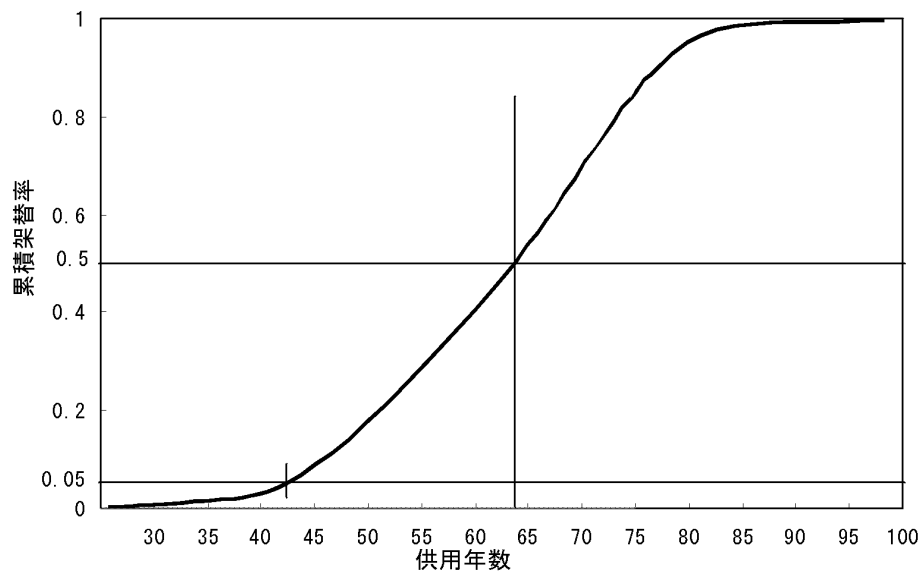


(b) 下部構造損傷

図-2 上下部構造の損傷による架替までの供用年数 (H8調査)



供用年数別累積更新率（建設省） S60ごろ



供用年数別累積架替比率 H8ごろ

図-3 供用年数別累積更新率（S60頃及びH8）

(3) 橋梁の寿命と維持管理に関する文献

(出典：道路橋の寿命と維持管理 西川和廣 土木学会論文 No.501/I-29, pp1-10, 1994.10)

3. 工学的永久橋を実現するための方策

(1) 橋の寿命を決定する三つの要因

どんな現象にも必ず原因がある。橋の寿命を損なう損傷劣化にも、すべて原因があるはずである。それらの原因をすべて特定し、何らかの防止対策が講じられるならば、工学的な永久橋の実現は可能となる。

橋の寿命を決定する要因は、以下に述べるように設計、施工および維持管理に関わる要因に分類するとわかりやすい。

① 設計要因

設計に関わる要因といえば、鋼橋では疲労設計や防錆(食)対策、コンクリート橋では中性化によるコンクリートの劣化対策が思い浮かぶが、これまで寿命を想定した設計は、系統立てて行われてこなかったことに気づく。

これらの中で、構造設計の対象として解析される主部材の疲労設計については、疲労設計活荷重の設定と目標供用年数(ここでは200年を提唱)が設定されれば、ほとんど確立されているといってもよい。しかし、二次応力やたわみ(差)に起因する疲労や腐食については、今後の研究に待つところが多い。

コンクリート橋については、塩害対策についての技術基準は示されているものの、寿命との関連で記述されたものは見られない。

また、間接的には、維持管理への配慮も設計要因に含まれるかもしれない。

さらに、限界状態設計法のように、経験に頼らず、すべての限界状態について漏れなく陽な形で配慮する設計法に移行するには、ここにあげた項目について、慎重に吟味した上で限界値を定める必要がある。

② 施工要因

従来、期待されたより早期に損傷が生じた場合、施工不良が第一に疑われることが多く、実際にその通りであることが少なくなかった。とくに、現場で材料の段階から施工されるコンクリート部材では、その傾向が顕著である。

しかし、近年ではわが国における施工技術も上がり、むしろ施工上の配慮により長寿命化を前向きに追求する時代に入ったのではないかと筆者は考えている。ただし、建設市場の国際化にともない、品質確保の方策を改めて検討してゆくことも大切である。

③ 維持管理要因 —維持管理で救える橋の劣化—

これまで維持管理を、橋の供用年数とともに不可避免的に増大を続けるもので、永久に橋を使おうと思えば、膨大な出費を余儀なくされると考えられてきたような傾向がある。しかし、経験を積んだ管理者ならば、設計、施

工の段階では気がつかなかった問題点が見える。比較的簡単な改良によって、維持管理の負担は、大幅に減らすことができるものなのである。

橋の損傷原因のほとんどは、何らかの形で水が関与している。腐食はもちろん、凍結融解、洗掘、塩害なども水が主因あるいは腐食物質を媒介するし、アルカリ骨材反応やRC床版の損傷も、水が補給されることにより加速する。したがって、排水や防水など、水回りの改良により弱点をカバーすることができる。

(2) 工学的永久橋実現のための具体策

本節では、工学的永久橋を実現するためにどんな手法があり得るか、2, 3の損傷劣化を対象に、個人的なアイデアを含めて述べる。

a) 鋼橋の腐食

鋼橋の腐食原因は、① RC床版のクラック、打ち継ぎ目、施工不良に起因する漏水、② 桁端（伸縮装置）からの漏水、③ 水たまり、土砂の堆積、④ 海からの飛来塩分、凍結防止剤の影響、⑤ 高湿度による結露、⑥ 路面からの水、埃、土砂、⑦ 添接部からの水の浸透などに分類されるが、これらは排水等水回りの改良や床版防水層の設置等により、かなりの部分が対処可能である。また、それぞれの原因による腐食の生じやすい部位やディテールが明らかにされれば、設計、施工段階においても対応が可能となる。たとえば特定の部位の塗装をより厚くすることや、錆代を見込むことなどが考えられる。また、重要な橋であれば、箱桁や主塔の内部は空調により乾燥状態を保つことも選択肢に加えられる。

さらに、使用材料や特殊な被覆によっても対処可能であり、耐候性鋼材の裸使用、溶融亜鉛めっき、ステンレススチールやチタンによるクラッド鋼などの使用も考えられる。

b) コンクリート部材の劣化

コンクリートは圧縮部材として使用している限り耐久性はかなり高いが、ひとたびクラックが生じ、開閉が繰り返されると、急激に耐久性を失ってしまう。文献³⁾によれば、「大正時代に架設された23のアーチ橋については、62年以上経過した現在（昭和62年）においても、老朽化が原因で撤去された例は一橋もない」。このことは、圧縮部材として使用する限り、コンクリート部材の耐久性はかなり高いことを表しており、耐久性向上のために有効にプレストレス導入にすることにより、コンクリート構造物の寿命は飛躍的に向上することを示唆している。コンクリートの劣化が二酸化炭素による中性化や鉄筋の腐食によるものであることを考えれば当然の結果である。

したがって、工学的永久を実現するためには、活荷重による曲げや引張を受ける部材（床版を含む）にはRC構造を使用するべきではないといえる。プレストレスを

導入することにより、コンクリート床版の耐久性が飛躍的に向上することは、いくつかの実験により確認されている。

また、クラックとは違うが、路面排水等のためのパイプを床版などコンクリート部材の中を通すことも、水や空気の通りやすい不連続部をわざわざつくることになって、部材の耐久性を損なう原因となる。配水管の破損により、周囲のコンクリートが劣化しているのを見かけたことのある人は多いのではないかと思う。これに対する対策としては、床版面の防水層をしっかりと施工し、さらに路側に側溝を設けることにより、縦断勾配を利用して排水することや、排水柵を一体成形したプレキャスト床版等の開発が考えられる。橋の側溝についてはフランス等で例があるようである。

c) 支承の機能喪失による支点部の損傷

鋼製支承の水平及び回転機能が、腐食や磨滅により失われ、その結果温度変化や活荷重による移動を拘束することになり、橋本体の支点部に損傷を与えた事例が多く見られる。支承の機能の寿命が橋本体に比べて短いことは当然推測されることであり、本来適切な時期に交換されるべきものと考えられる。

対策としては、支承の交換を容易にする構造を設計の段階で考慮し、かつ交換を適切な時期に行うことが基本であるが、ゴム支承のように機能を失いにくく、たとえ劣化しても、上下部構造を破損させるほど拘束力が大きくならないものを選択することも考えられる。

d) 伸縮装置の破損による衝撃および漏水による損傷

伸縮装置についてはたくさんタイプが開発されているが、直接輪荷重の影響を受けるため、なかなか耐久性の優れたものは見つからないのが実態である。これについては、設計において極力多径間連続形式を選択して伸縮装置そのものを減らす努力をすることや、既設の橋に対しては、いわゆるノージョイント化（桁や床版の連結や舗装面における埋設ジョイント工法）を施すことにより、既存の伸縮装置を除去することも一方である。

(3) 橋の健康状態と維持管理

維持管理にはタイミングが重要である。筆者が日頃技術指導を行う場合に頭に置いている、橋の健康状態と維持管理の関係を図示したものが図-6である

図は、橋の受ける損傷を腐食などの劣化現象、疲労および地震等の災害に分けて損傷の進行状況と原状復帰の可能性とその労力について表している。ここでは、橋の健康状態は、人の健康状態になぞらえて健康、軽傷、重傷、重体およびご臨終の5段階に分類している。

健康というのは、人間であれば年一回の健康診断を行っていれば、十分に健康が維持できる状態をいい、橋では定期点検以外に手のかからない健全な橋を意味する。大半の橋がこのレベルにあることが、維持管理負担

	必要な措置	腐食・劣化	疲労	震災
健康	健康診断(定期点検)	○○○	○○○	○
		↓↑↑	: ↑↑	:
		↓↑↑	: ↑↑	:
		↓↑↑	: ↑↑	:
軽傷	維持管理作業(投薬)	▽△全	△↑	
	健康体には復帰可能	↓ ↑	: ↑	:
		↓ ↑	↓ ↑	:
		↓ ↑	↓ ↑	:
重傷	補修工事(外科手術)	▽△	▽△	
	健康体には復帰可能	↓	↓	:
	補修補強は原因次第	↓	↓	:
		↓	:	:
		↓	:	:
重体	延命はある程度可能	▽		
	健康体復帰は不可能	↓	:	:
		↓	:	:
		↓	↓	↓
ご臨終		×	×	×

図-6 橋の健康状態

を適正なレベルに保ち、破綻を来さないためにも重要な条件である。

軽傷は人間では風邪ひき程度で、簡単な投薬で健康体に復帰できる状態を意味している。橋に置き換えると、塗装の劣化や排水装置の破損が発見された状態に該当する。この程度であれば、比較的簡単な維持管理行為により、もとの状態に復帰させることができる。

重傷というのは、人間では骨折や入院して手術が必要となるような大病を意味する。治療はかなり大変であるが、しっかりした処置を受ければ社会復帰できる。橋においては、腐食が放置されてかなり進行した状態や、疲労亀裂が発見された状態などに対応する。大がかりな補修工事により、健全な状態に復帰させることは可能であるが、補修後しばらくは頻りに点検を行うことが必要となるなど、維持管理上かなりの負担になる。

重体ともなると、延命はある程度可能であるが、もはや健康体への復帰は不可能になる。かなり良くなるとしても、後遺症が残る可能性が高い。橋の場合も同様で、この段階まで損傷が進んでしまうと、恒久的な補修はほとんど不可能になってしまう。架換までの限られた期間の供用を確保することしかできなくなる。もちろん、財政的にも労力についても維持管理負担は非常に大きいものになる。

ご臨終というのは説明の必要はないと思うが、橋においては落橋事故や長期間の閉鎖に該当し、どうしても避けなければならない状態である。

腐食劣化については、その程度が進むほど回復のための労力が大きくなることを、矢印の太さで示してある。

疲労の場合は、損傷が目に見える形で発見された時点では、既に重傷の領域であること、またその時点で発見

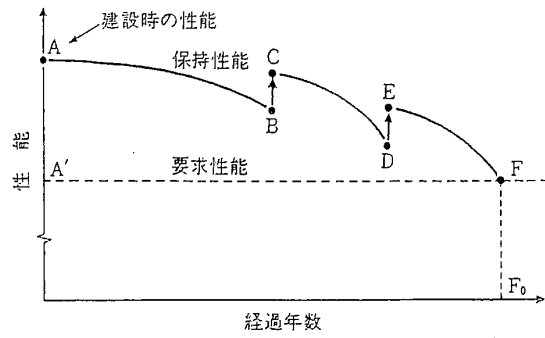


図-7 一般に用いられる構造物の寿命の概念図

できないと、一気に致命的な状態に至る可能性があることを示している。ある種のディテールを有する橋に損傷が生じることが判明したとき、同様な部位に対して健全なうちに対策を施す場合のみ、比較的容易に対処することが可能である。

災害による損傷は、ある日突然に生じるため、維持管理の中で対応できることは少ない。設計において、太い矢印がより高い位置で止まるように努力することが、唯一の対策となる。

4. 橋の損傷劣化モデル

(1) 従来の劣化モデルの問題点

維持管理を最適化するための検討をするには、橋の劣化損傷と維持管理負担の関係をモデル化する必要がある。

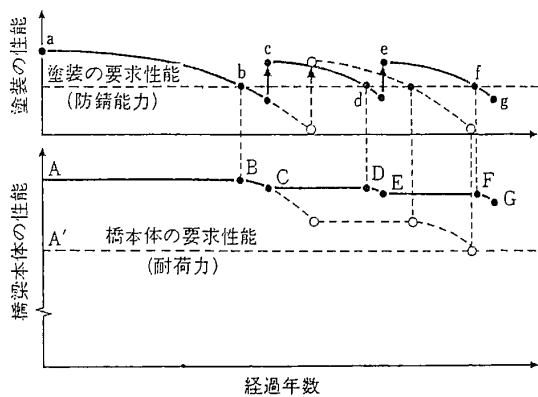
構造物が保持する性能の経時的な変化(劣化)を表すのに図-7のような概念図を用いることが多い。これによれば概念としては理解しやすいが、実際に橋の維持管理に適用しようとすると不都合な点が少なくない。

このモデルの問題点は以下の通りであると思われる。

- ① それぞれ異なる性質や機能を有する多くの部材からなる橋梁の劣化損傷をひとつの曲線で表そうというのがそもそも無理である。
- ② このため、縦軸の「性能」が具体的に何を指すのか明確にならない。
- ③ 限界性能(物理的でも機能的でもかまわないが)を一定値と考えている。前節で述べたように、限界値は維持管理能力との相対的な関係で決まる変動値である。

橋の損傷劣化モデルというのであれば、図の縦軸に表される性能というのは、橋としての存続に関わる基本的な性能、たとえば耐荷性能でなければならない。

図示された曲線は塗装か何かの劣化をイメージしたものらしく、架設直後から徐々に下降を始め、時間の経過とともにそれが加速される。そして維持管理行為によって、C点において性能が回復する。塗装の劣化曲線としてはこれでよいのかもしれないが、橋本体として考え



図—8 本体と関連要因の性能を分離表示したモデル

ると、架設後いきなり性能が低下し始めるのは不自然であるし、低下した耐荷性能が簡単に回復するというのも実感とかけ離れている。

そこで、ここでは橋本体と本体の劣化損傷に関わりのある広義の部材を分離して表示するモデルを提案することにした。

図—8は、橋本来の性能である耐荷力と、間接的にそれに影響を及ぼす要素を分け、わかりやすくするために間接影響要素として塗装ひとつだけを取り上げて示した。

図には二つの性能を示す曲線が描かれているが、上側の曲線は塗装の性能、すなわち塗膜の劣化度あるいは防食性能を表しており、図—7と同様の変化を示している。

下側の曲線は、橋本体の耐荷性能を表している。塗膜が劣化しても、防食膜としての一定の性能を確保している限り、橋本体の性能、すなわち耐荷力には何の影響も現れないことは容易に理解されるであろう。しかし、塗膜が塗装としての要求性能を下回るような状態になると（図中b点）、本体の性能にも変化が生じ始める。これは、実際には錆や腐食が発生することに相当する。

図中の破線は、実線の場合よりも塗装の時期を遅らせたことに相当するが、塗装にかかるコストは減らせる代わりに、本体の耐荷性能の低下は加速する。そして、低下した耐荷性能は再塗装を行っても回復することはない。

以上が提案した損傷劣化モデルの説明であるが、塗装以外の要素を描き加えることによって、このモデルがより実態に近いものになることは容易に理解されよう。また、それぞれの要素の経年劣化と本体の耐荷性能に及ぼす影響を注意深く分析することにより、橋の損傷劣化を数式で表すことも可能になるのではないかと予想される。

さらに、このように表現することにより、長寿命化の方法として、橋本体の初期性能を高めることのほかに、塗装など間接的に影響する要素の性能を、適切な維持管

理により確保するという選択肢の存在も明らかになる。

(2) 橋本体への影響から見た部材の分類

前節では、橋本体と本体の耐荷性能に間接的に影響を及ぼす部材に分けてモデル化を行ったが、以下のように三つに分類する方が適切かもしれない。

- ① 劣化が進むことによって、そのまま橋全体の保持性能（耐荷力）の低下につながる部材（主桁、主構）。
- ② そのものの劣化は直接橋の性能低下にはつながらないが、放置することにより①の性能低下を招く部材（塗装、支承、伸縮装置、排水装置 etc.）。
- ③ ①と②の中間的な存在で、それ自身の劣化も橋の性能（耐荷力）の低下に影響するが、いざとなれば交換可能な部材（RC床版）。

また、場合によっては以下のような分類も有効であるように思える。

- ① 供用期間内に交換する可能性のない部材。あるいは、交換＝架換えとなる部材（主桁、主構）。
- ② 必ず交換あるいは再施工が必要となる部材（塗装、支承、伸縮装置、排水装置 etc.）。
- ③ 条件によっては①にも②にもなる部材（RC床版）。

この分類では、新技術により②が③や①に格上げになる可能性などが見やすくなる。

いずれにしても、この点については、今後、さらに検討を進めてみたいと考えている。

2. 設計において考慮する期間の例

参考資料 1 鋼道路橋の疲労設計指針（平成 14 年 3 月：日本道路協会）P29 より抜粋

第 4 章 応力度による疲労照査

4.1 一般

4.2 から 4.3 までの規定は、主として床版を除く鋼製の上部構造の自動車荷重に対する疲労設計に適用する。

本章に規定する疲労設計法は、鋼製部材の継手に対して公称応力の範囲に基づいて定められた疲労設計曲線を用いて疲労耐久性の照査を行うものであり、本章の規定は、自動車荷重の繰返し載荷の影響による疲労を対象に定めたものである。

本指針に規定する応力度による疲労設計の流れはおおむね次の通りである。まず疲労設計荷重を車線に対して移動載荷して得られる応力変動に対して応力範囲を求める。これに対して各継手の一定振幅応力に対する応力範囲の打切り限界による照査を行い、これを満足しない場合には設計で考慮する期間の繰返し載荷の影響を考慮して線形累積被害則の考え方に基づく照査を行う。なお、本指針の検討にあたっては設計で考慮する期間として 100 年を目安としている。

床版のうち鋼床版の疲労設計については第 5 章が適用できる。またコンクリート床版のうち道路橋示方書の規定に従って設計された鉄筋コンクリート床版、プレストレストコンクリート床版については、一般に疲労耐久性が確保されていると考えてよい。

参考資料 2 道路橋示方書Ⅲ（平成 14 年 3 月：日本道路協会）P172,P174 より抜粋

表-5.2.1 塩害の影響による最小かぶり (mm)

塩害の影響の度合い	構造 対策区分	(1) 工場で製作されるプレストレストコンクリート構造	(2) (1)以外のプレストレストコンクリート構造	(3) 鉄筋コンクリート構造
		影響が激しい	S	70 ^{M1}
影響を受ける	I	50	70	
	II	35	50	70
	III			50
影響を受けない		6.6.1「鋼材のかぶり」による		

^{M1} 塗装鉄筋の使用又はコンクリート塗装を併用

表-5.2.2 塩害の影響地域

地域区分	地 域	海岸線からの距離	塩害の影響度合いと対策区分	
			対策区分	影響度合い
A	沖 縄 県	海上部及び海岸線から100m まで	S	影響が激しい
		100m をこえて300m まで	I	影響を受ける
		上記以外の範囲	II	
B	図-5.2.1及び表-5.2.3に示す地域	海上部及び海岸線から100m まで	S	影響が激しい
		100m をこえて300m まで	I	影響を受ける
		300m をこえて500m まで	II	
		500m をこえて700m まで	III	
C	上記以外の地域	海上部及び海岸線から20m まで	S	影響が激しい
		20m をこえて50m まで	I	影響を受ける
		50m をこえて100m まで	II	
		100m をこえて200m まで	III	

表-5.2.1及び表-5.2.2は、これまでの塩害損傷の実態及び飛来塩分量全国調査の結果、コンクリートの塩分浸透試験に基づき、設計上の目標期間を100年と想定して定めたものである。なお、コンクリートの塩分浸透度合いは、コンクリートの水セメント比に影響されるため、表-5.2.1はそれぞれ水セメント比を表-解 5.2.1と想定したものである。

以上