

鉄道施設の維持管理・更新に関する調査

1——調査の背景と目的

1.1 調査の背景と目的

これまで蓄積されてきた膨大な鉄道ストックは、開業から数十年経過しているものも多く、鉄道構造物の劣化や疲労が確実に進行しており、今後、日常的な維持管理費のみならず、大規模な施設更新に伴う投資の増加も懸念される。

一方、鉄道経営面では、近年の社会経済情勢、急激な少子高齢化の進展など、輸送需要の大幅な増加が期待できない状況であるため、鉄道事業者による鉄道施設に対する従来どおりの積極的投資は期待し難いと想定される。

このような状況においても、施設の維持管理・更新を適切に行い、サービスレベルや安全性を維持することは引き続き必須の要件であるため、限られた予算内でより効率的に施設の健全性を確保していく方策の検討が必要と考えられる。

本調査ではこうした背景をもとに、特に「構造物の効率的な安全性確保」を重視する観点でのマネジメントツールとして、現在欧米の道路事業を中心として開発が進んでいるアセットマネジメント(資産運用管理)の鉄道事業への導入可能性を検討することを目的としている。

なお、本調査は都市鉄道整備等基礎調査の一環として平成15～16年度の2ヵ年調査として実施しているものであり、本稿はその中間報告を取りまとめたものである。

1.2 本調査に関するこれまでの経緯

アセットマネジメントの鉄道事業への導入については、都市鉄道整備基礎調査の一環として、平成14年度までに、鉄道事業へ導入した場合の全体フレームの開発を重点に、ある特定の区間を対象とした試作運用モデルの作成を行ったところである。

これを受けて本調査では、この試作運用モデルをもとに、システムを構成する各要素をどのように改良すれば実用化に近づくことが可能かを検討し、システム全体の枠組みを精査するとともに、ケーススタディを通じて、これまでの区間単位から路線単位へ対象を拡張する際の課題について検討を行うことを目的としている。

2——本システムの概要

2.1 前提条件

システム構築上の前提条件を下記のように設定した。

- ・ 使用者：事業者もしくは政策担当部門
- ・ 使用目的：補修予算計画の策定
- ・ 運用方針：ある水準の状態を維持して補修費を削減（あるいは平準化）
- ・ 対象資産：施設(土木構造物)
- ・ 要求精度：10年程度の計画ができる精度

インフラを対象としたアセットマネジメントの手法は未だ確立されておらず、人によってそのイメージが大きく異なることから、本調査ではある程度の条件を設定し、限定したモデルに対して以降の調査・検討を進めるものとした。

アセットマネジメントは本来、様々な施策を検討し計画するものであるが、本調査では維持管理という点に着目し、施策は「補修」に限定した。すなわち、補修を行う時期や量をシミュレーションすることで最適化するシステムの構築を目指すものである。今後「更新」や「改良工事」等の施策を選択できるように発展させることは、本調査以降の課題と考えられる。

また、本システムの運用方針としては、

- 1) ある水準を維持して補修費を削減
- 2) ある一定の補修費のもとに状態を最良化

の2通りの運用が考えられるが、前者の方が鉄道事業者の実務担当者に理解され易いと考えられることから、前者を基本とした。ただし、補修費の平準化という観点からは後者の視点も重要であることから、後者の方針にも対応可能なシステムを検討している。

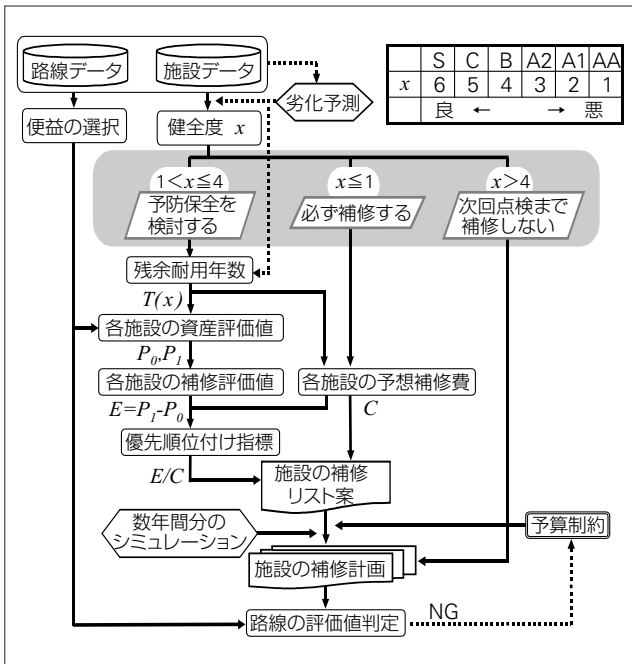
2.2 本システムの構成

本調査において検討しているシステムフロー(試案)を図1に示す。このシステムを構成する各要素の現段階における考え方は以下のとおりである。

2.2.1 構造物の点検データと補修の要否判定

構造物の状態を表す指標としては、全般検査における点検結果(健全度)を用いるものとした。これをもとに補修の要否を判定し、最低限の安全性を確保する。ただし、健全度が予防保全を検討する範囲にあるときは、補修の費用対効果により補修の優先順位を付ける。また、路線全体の資産評価値をシミュレートし、常に管理目標以上の水準を保つことを確認する。

点検判定(健全度)は鉄道総合技術研究所による6ランク



■図一 全体フロー試案

判定 |S, C, B, A2, A1, AA| が最も一般的であることからこの6ランク判定を基本とした。

また「予防保全」の定義は「構造物がある限界に達する前に行う補修工事」とした。ただし、各鉄道事業者によって点検判定手法が異なることも考えられることから、点検判定のランクと閾値の設定には注意する必要がある。

■表一 点検判定例

例) 鉄道構造物の全般検査		例) 道路橋	
区分	変状の程度	区分	状況
AA	重大	I	損傷が著しく、交通の安全確保の支障となるおそれがある。
A1	変状が進行し、機能低下も進行	II	損傷が大きく、詳細調査を実施し補修するかどうかの検討を行う必要がある。
A2	変状が進行し、機能低下の恐れ	III	損傷が認められ、追跡調査を行う必要がある。
B	進行すればAランク	IV	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある。
C	軽微	OK	点検結果から、損傷は認められない。
S	なし		

鉄道総合技術研究所による「建造物の保守管理の標準・同解説」より
(旧)建設省土木研究所による「橋梁点検要領(案)」より

2.2.2 資産評価額の算出

① 資産としての原単位

補修による費用対効果を判定する際の資産の原単位は構造物単位とした。(ここでの構造物単位とは、トンネル等の場合には10~100m程度の管理単位を指す。)

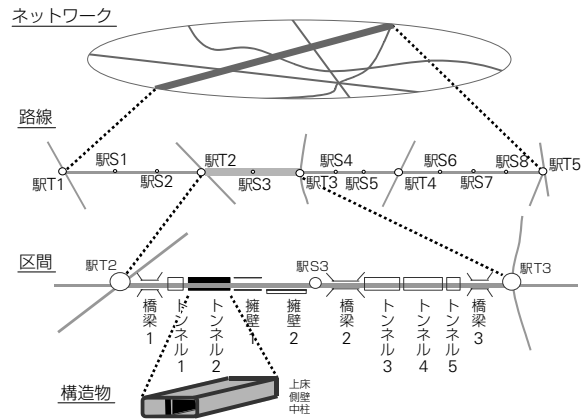
これは補修の単位としては、部材の損傷箇所部のみを補修する保全方法もあり得るが、本調査で想定する補修予算計画は即時的な比較的軽微の補修を対象としているのではなく、構造物単位で集中的に行われるような、ある程度の規模を有する補修を対象としているためである。

なお、点検判定、劣化予測、補修費予測の原単位は部材単位とする。点検判定は部材単位で行われているものと想

定し、それらから構造物単位、駅間単位の資産評価額を算定する。これは、劣化予測や補修費予測に関しては部材毎の特性が影響するため、部材単位で予測する方が、精度が良いと考えられるためである。

また、部材単位の健全度から構造物単位の健全度を評価する方法にはさまざまな手法が考えられるが、ここでは最も劣化が進んだ部材の健全度が構造物全体の健全度を代表するものと仮定する。

ただし、路線全体の判定を行う際の資産の原単位は鉄道の連続性を考慮し、区間(もしくは駅間)単位とする。



■図二 施設の構成階層

② 資産の評価方法

- ・会計上の資産価値と区別するため、本システム上での資産の価値を「資産評価値」と呼ぶ。
- ・資産評価値は資産が生み出す価値と捉え、インフラ会計における割引現在価値の考え方をもとに、駅間便益(運用主体により内訳を選択)を用いて算定する。
- ・健全度に応じた残り耐用年数間を評価期間とした駅間便益(円/年)の合計から異常時のリスク(期待損害額)を差し引くことで算定する。(ただし、社会的割引率を考慮)

【構造物単位】〔補修優先順位付け用の資産評価値〕

$$(\text{資産評価値}) = (\text{残り耐用年数間の便益})$$

$$- (\text{異常ケース下におけるリスク額})$$

$$P = \int_0^{T(x)} B \times e^{-\rho t} dt - \int_0^{T(x)} \left(\sum_{i=k-S}^{k-S} p_i q_i \right) \times e^{-\rho t} dt$$

ここで、 B : 駅間便益(円/年) ρ : 社会的割引率

$T(x)$: 残り耐用年数; 点検判定に応じた残りの耐用年数。ここでは「今後無補修で通常運行に支障をきたさないと予想される年数」と定義し、「通常運行下で使用限界に達するまでの残り年数」で表すものとする。

p : 異常ケース下における損害発生確率

q : 異常ケース下における損害が発生した場合の(平均的)損害額

【駅間単位】[路線の管理目標把握用の資産評価値]

(資産評価値) = (駅間最小の残り耐用年数間の便益)

− (異常ケース下におけるリスク額の駅間合計)

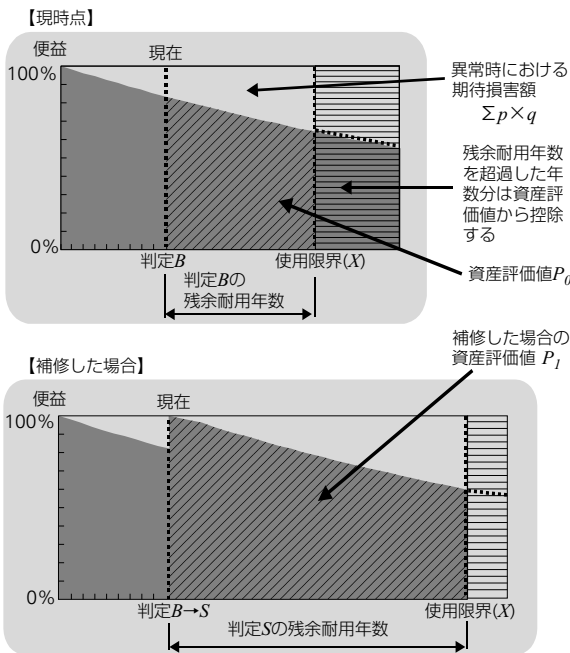
$$P = \int_0^{T_{min}} B \times e^{-\rho t} dt - \int_0^{T_{min}} \sum_{j=構造物} R_j \times e^{-\rho t} dt$$

ここで, T_{min} : 駅間構造物のうちの最小の残余耐用年数

R : 構造物単位の年期待損害額 ($R = \sum p \cdot q$)

基本となる便益(円/年)は運政審モデル(需要予測モデル)等により算定された区間便益を, 駅間利用者数で駅間に按分したものとす。

便益の内訳は「供給者便益, 利用者便益, 環境等改善便益」に分類される。鉄道事業者が本システムを運用する場合には, 供給者便益のみで評価することで経営判断の1ツールとして用いることができる。一方, 政策担当部門が運用する場合には, 3便益の合計を用いるべきである。このように, 運用する者によって資産評価値の中身は異なるものとなる。



■図—3 資産評価値の概念図

■表—2 固定資産における資産価値評価の分類

	評価方法	インフラの場合	特徴
取得原価	取得時に支払われた現金(もしくはそれに準ずるもの)	初期建設費	客観性・検証可能性高い。物価変動時には適切ではない。
再調査価額(取替原価)	測定日で再取得した場合に支払われる現金(もしくはそれに準ずるもの)	再調達価格(現在価値による建設費)	インフラ市場は限定的であり, 客観性・検証可能性が低い。算定は実務上膨大な作業となる。
割引現在価値	将来キャッシュフローの割引現在価値	将来の事業利益を現在価値に割引いたもの	営利目的の事業を行っていない公的部門には適用困難。
正味実現可能価額(実現可能価額)	現時点での通常の売却によって得ることのできる現金(もしくはそれに準ずるもの)	売却価格	インフラ資産は売却がそもそも想定されていないため, 適用は困難。

構造物(施設)の状態を反映したインフラ価値の評価方法を研究しているインフラ会計の分野においても, 資産価値の評価方法は様々な概念があり, 現段階では評価方法は確立されていない。表—2は固定資産の価値化の概念をまとめた小林潔司らによる分類をもとに作成したものであるが, 資産価値を「資産が生み出す利益」と捉えるアセットマネジメントにおいては収入額で評価する方が妥当であると考えられるため, 割引現在価値を基本概念としたものである。

③ リスク

異常時における損害をさまざまなケースに分類し, それぞれの直接被害, 間接被害を以下により算定する。

$$(期待損害額) = (発生確率値) \times (予想損害額)$$

我が国は地震多発国であり, 過去にも大地震を経験し大被害を被ってきた。本調査においても, 地震による期待損害額がリスクの主要因になるものと想定し, 地震時リスクについて初期設定を行うものとした。また, その他の異常時下のリスクとしては図—4のように分類した。

リスク項R = 地震 + 台風 + 津波 + 洪水 + その他

初期設定値として概算推定値を設定する (地震); 局所的であり, 無視できない場合には, 別途に算定し, 入力する (台風, 津波, 洪水, その他)

	健全度	発生確率値	予想損害額	地震			台風			津波			洪水			その他		
				予想損害額	予想損害額	予想損害額	予想損害額	予想損害額	予想損害額	予想損害額	予想損害額	予想損害額	予想損害額	予想損害額	予想損害額	予想損害額		
直接被害	S	p_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s	q_s
	C	p_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c	q_c
	B	p_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b	q_b
	A2	p_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}	q_{A2}
	A1	p_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}	q_{A1}
間接被害	S	p'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s	q'_s
	C	p'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c	q'_c
	B	p'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b	q'_b
	A2	p'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}	q'_{A2}
	A1	p'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}	q'_{A1}

■図—4 リスクの分類(案)

また, リスク設定の一例として, 地震時の期待損害額を阪神淡路大震災の損害額から推定し, 以下のように設定する。

【耐震補強なし】(阪神淡路大震災より推定)

発生確率: 直接間接共にS~A1; 2×10^{-4} , AA; 3×10^{-4}

直接被害: 復旧額 = 150億円/km

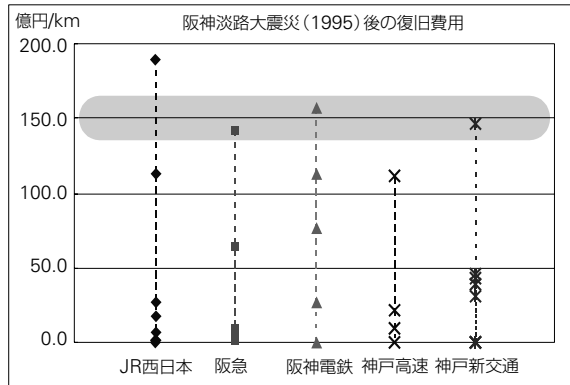
間接被害: 被害額 = 連休期間6ヶ月分の便益損失

【耐震補強有り】(上記の約1/5の被害と仮定)

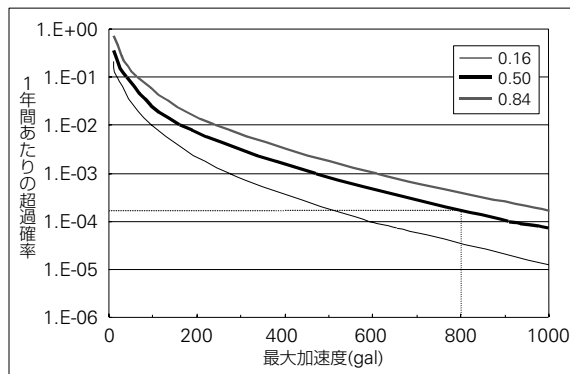
発生確率：直接間接共にS~A1； 2×10^{-4} ，AA； 3×10^{-4}

直接被害：復旧額=30億円/km

間接被害：被害額=運休期間1ヶ月分の便益損失



■図-5 キロ当たり推定復旧費用



■図-6 地震ハザード曲線

上記は、間接被害については運休による被害額のみをとりあげたが、本来は負傷・死亡損害額等も対象とすべきであり、今後、その推定方法の研究が進むに従って可能な限り計上するものとする。

また、リスクに関しては統計データが不足しており、現段階では、その期待損害額を精度良く推定することは困難である。また、点検判定ランクが下位になるにつれて損害発生確率値がどのように増加するのかについても現時点では不明である。よって、当面は上記のように初期設定値を大きく見積もっておき、今後、推定方法を精査していくことが必要となる。

④ 管理限界と使用限界

管理限界とは必ず補修する状態を指し、使用限界とは運行できない状態を指す。

管理限界とは健全度AAの状態にあたり、即時補修が必要な状態を指す。ただし、現実的には「即時」と言っても余裕がある場合があり、ただちに運行できなくなるような状態を指すわけではない。

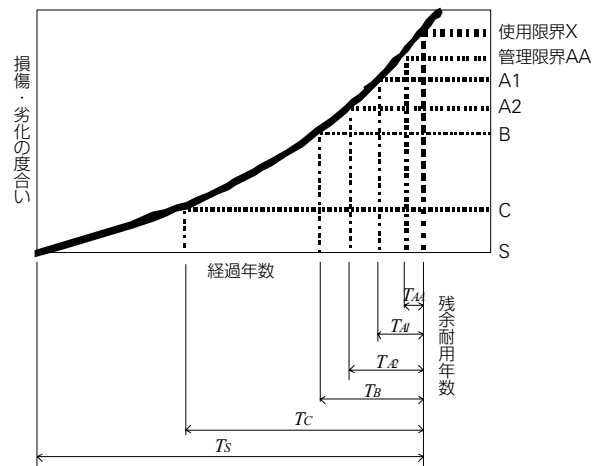
使用限界とは健全度AAの状態から更に損傷が悪化した状態であり、運行できない状態を指す。ここで「運行できな

い」とは構造系の崩壊を指すのではなく、例えばトンネルならば、コンクリートの剥落が続発してその危険性が高いため、何らかの対策なしでは運行を見合わせざるを得ない状態などを指す。

⑤ 残余耐用年数

今後無補修で通常運行に支障をきたさないと予想される残り年数と定義し、通常運行下で使用限界に達するまでの残り年数をもって表す。

耐用年数の定義が曖昧であるため、本調査では「残余耐用年数」を定義した。前述のとおり、この残余耐用年数間が資産評価値を算定する際の便益評価期間にあたる。



■図-7 残余耐用年数

2.2.3 劣化予測

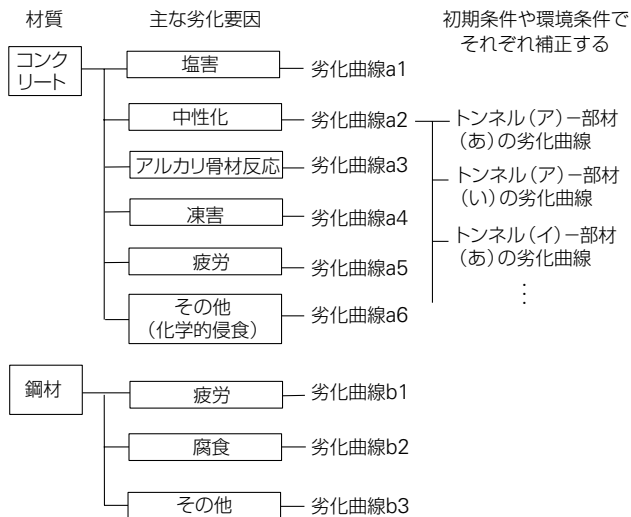
① 劣化曲線の推定

劣化要因別に予測曲線を推定し、健全度の経年変化をシミュレートする。ただし、運用中に新たな点検結果が加わる度に予測曲線を補正するものとする。また、劣化要因毎に残りの耐用年数を算定し、最も短いものをその構造物の残余耐用年数とする。

劣化要因による分類は図-8のように行う。なお、複合劣化に関しては未だ研究途上の部分であるため、現段階では考慮しないものとする。

本調査における試作モデルでは、初期設定する劣化曲線は予測式がある程度確立されている劣化事象を対象とした。具体的には、表-3の4つの劣化要因とする。

点検判定ランクの中間値に関しては、残余耐用年数を点検員の経験に基づく判定によって設定し、劣化曲線から逆算することでそれに対応する状態変数を算出することができる。(鋼材の疲労に関しては累積疲労損傷度の中間値と点検判定ランクの中間値の対応表が鉄道総合技術研究所により作成されているので、これを用いるものとする。)また、現段階では劣化曲線を精度良く推定することは困難であるた



■図-8 劣化曲線の分類

■表-3 劣化予測曲線の推定(案)

劣化要因	状態変数	管理限界(AA)	使用限界(X)
コンクリート【塩害】	鉄筋腐食量(拡散式および経験式)	$56(C/\phi) \times 10^{-3} \text{mm}$	AAより1年
コンクリート【中性化】	鉄筋腐食量(\sqrt{t} 則および経験式)	$56(C/\phi) \times 10^{-3} \text{mm}$	AAより1年
鋼材【疲労】	累積疲労損傷度(Miner則)	$D=1.0 (=A1)$ となって1年経過した時点	AAより1年
鋼材【腐食】	板厚減少量(べき乗近似式)	現有応力比率100%となる板厚減少量	AAより1年

め、算定結果の残余耐用年数が非現実的な年数とならないように、その上限値を設けるものとした。

- 1) 構造物単位の資産評価値を算定するための残余耐用年数：最大70年(初期設定)
- 2) 駅間単位の資産評価値を算定するための残余耐用年数：最大30年および50年(需要予測モデルの評価年数とあわせるものとする。)

■表-4 残余耐用年数の設定(案)

材質	劣化要因	健全度		残余耐用年数
		S	6	
コンクリート	塩害・中性化	C	5	(劣化予測より算出)最大70年とする
		B	4	20
		A2	3	8
		A1	2	4
		AA	1	1
		鋼材	腐食	S
C	5			(Sと同値とする)
B	4			20
A2	3			8
A1	2			4
AA	1			1

② 劣化曲線の補正

劣化予測曲線はあくまでも劣化進行の代表トレンドを示すものであり、シミュレーションを続けていくうちに予測値と実測値の誤差が大きくなる可能性がある。そこで、点検結果や実測値が更新されるたびに逐次に劣化曲線を補正するものとした。

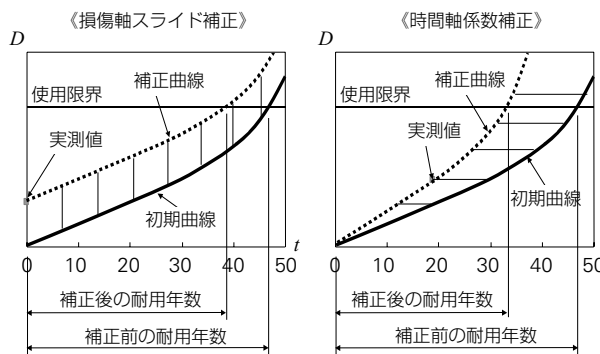
実測値を用いて初期設定の劣化曲線($D=f(t)$)を補正する方法としては下記の2種類の手法を用いるものとする。

- 1) 初期状態に関する誤差補正(初期点検結果, 補修時点検結果による補正)

損傷軸スライド補正 $D=f(t) + \Delta$

- 2) 使用条件・環境条件に関する誤差補正(中間実測値による補正)

時間軸係数補正 $D=f(t \times \Delta)$



■図-9 劣化曲線の補正方法

劣化予測の手法の一つとしては遷移確率行列を用いる手法が考えられる。これは統計データをもとに、過去の劣化進行速度と関係なく、今後の劣化進行速度を確率的に予想するものであり、ばらつきを有する幅のある予測を行えるものである。(平成14年度までに実施した調査では遷移確率行列を用いた)しかしながら、遷移確率行列の場合は過去の劣化進行速度を考慮した今後の劣化速度の補正が行えないという点が課題であった。

本調査におけるシステムの見直しに際しては、この手法を採らず、理論式・経験式をもとに、1本の劣化曲線(トレンド)として予測する手法を採用するものとした。現段階で数理式にて劣化進行を予測できる劣化事象は少ないが、今後の劣化予測研究が進むことによって、より多種の劣化メカニズムにおける精度の良い劣化予測が期待できるためである。また、この手法の場合には、点検結果による劣化予測の補正も、前述のように比較的容易に行える点が長所に挙げられる。

3— 今後の課題

本調査は中間報告の段階であり、引き続き、①補修後の劣化挙動、②補修工法と補修費の推定、③区間単位から路線単位への拡張、について検討するとともに、ケーススタディを通じて補修費削減効果(平準化)の検証を行う予定である。また、鉄道事業にアセットマネジメントの手法を導入する際の課題や路線の特性に応じた補正の手法についても検討を進めていく予定である。

(要約：東京工業大学 上田孝行)