



インフラ老朽化と安全-3
Infrastructure Aging and Safety No.3

劣化予測と対策時期

Deterioration Prediction and Measures Time

高木千太郎
Sentaro Takagi

(一財) 首都高速道路技術センター
上席研究員

前回までに社会基盤施設、特に道路橋を中心とした現状と課題、既存施設の現状把握に必要な点検、および点検結果を正しく評価する健全度診断(損傷度)に関して説明した。今回は、今国内で喫緊な課題となっている予防保全型管理への転換を進めるにあたって必要となる劣化予測と対策時期について述べる。これに先立ち、社会基盤施設の劣化予測及び対策時期の選択の必要性を説明する。

供用している施設の管理方法には、大きく分けて4つある。

一つ目は更新型管理である。放置型管理とも言う。特徴は、施設の供用を開始した後、点検や維持管理対策などの措置をほとんど行わない事である。更新型管理となる理由は、財源や人材の不足によって適切な管理を行いたくても行えないか、もしくは管理に対する認識が不足している場合である。私は個人的に、これを「知らぬが仏型」メンテナンスと呼んでいる。十数年前までは国内の多くの地方自治体が放置型管理であった。その理由を以下に述べる。社会基盤施設、特に道路橋の場合、高度成長期に国内の木製道路橋を鋼製、コンクリート製に架け替える事業が実施された。当該事業は、「永久橋架け替え事業」とも呼ばれていた。木製の橋梁はいずれ朽ち果てるので架け替えざるを得ないが、鋼やコンクリートを主材料とすれば半永久的に供用が可能であるとの説明を国が行い、それによって当該事業を推進したのが大きな理由である。また我が国の国民性に起因する所もある。欧米人は長期にわたって物を使い続ける考えを基本としているが、この考えを持つ日本人は少ない。欧米の場合、住居、家具、調度品などいずれも愛着を持って使うのが当たり前であり、誇りとも思っている。しかし日本人にとっては、家屋を事例にとれば木造が中心であり、高温多湿の環境下で長く使うには特別な配慮が必要となる。例えば、風通しと湿気の少ない高台を宅地として選定し家屋を密集させない、といった対応などが望まれようが、急峻な山と狭小な平地が多く、高温多湿気候の日本ではその実現は容易ではない。更に、巨大地震、台

風などの自然災害によって何度となく被災、その都度新たな施設への更新を余儀なくされてきた。即ち、家屋の長期使用が実現しにくかったためメンテナンスに関する関心が元々低く、従って半永久的に供用できる社会基盤施設という社会通念が余り疑われる事なく通用していたわけである。この考え方は、図1に示すリスク分析を見ていただければ理解しやすくなる。従来は右図のように、かなりの不安要素を抱える中間領域にある施設まで安全であると判断され、事故は起こらないと信じていた。古い施設が少ないから問題が起こる発生度も低く、メンテナンスを積極的に行う体質にはならなかったのである。写真1は、放置型管理の現状を表した実例である。写真に示すような状態になっても果たして本当に事故は起こらないのであろうか。私は何時事故が起こっても不思議ではないと大きな不安を抱いている。

二つ目は対症療法型管理である。事後保全型管理とも言う。施設に変状のあることが明らかになった時や、発生した変状を起因とする苦情が住民等からされた時などに、その都度措置する管理方法である。私はこれを「原因放置型」メンテナンスとも呼んでいる。国内の殆どの管理組織は、対症療法型管理である。対症療法型管理の特徴は、変状が明らかと

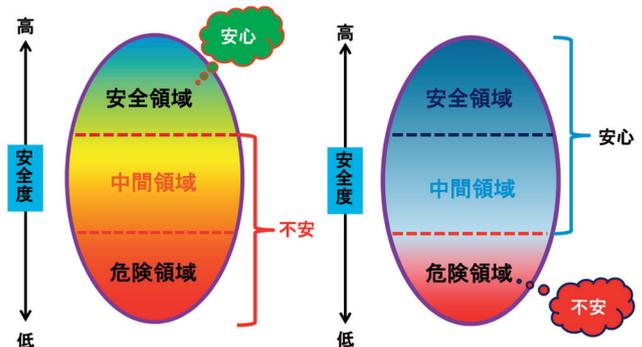


図1 中間領域のリスク分析イメージ

なった時点で措置を行うことになるが、変状が内在していても表面的に現れない限り措置は行わない、行えないのである。変状の程度を正しく捉え、発生原因を捉えた措置を行うことで重大な損傷へと発展しなければ良いが、内在する変状を見逃し重大損傷に進展する 경우가多々ある。また、同様な環境や構造、履歴の同様な施設であっても変状が無ければ措置を行わないことになるので、その後損傷が発生、進展し、事故に至った事例も多々ある。しかし、国内の現状を考えると対症療法型管理を行わざるを得ない場合もある。そこで、対症療法型管理で事故を防ぐ方法のポイントとしては、点検・診断を適切にそれも頻繁に行うことと、変状が一つでも発見された場合、ハインリッヒの法則(図2参照)を前提として、隠れた損傷、見えにくい損傷が必ずあると考え、早め早めに措置を行うことである。

そして三つ目が予防保全型管理である。今国内で種々な施設を対象に推奨されている管理方法であり、私は「転ばぬ先の杖型」メンテナンスと呼んでいる。国内外の維持管理先進



中柱がせん断破壊? 床版主鉄筋も破断!
「知らぬが仏」型メンテナンス

写真1 「放置型管理」の現状

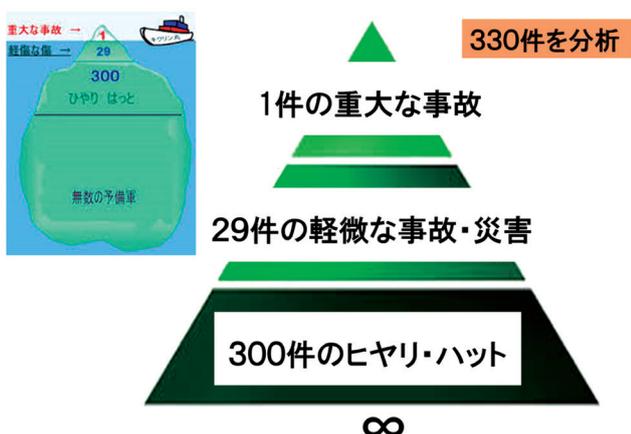


図2 「ハインリッヒの法則」イメージ

国の管理組織は、対症療法型管理から予防保全型管理へ転換を図っているが理想形となるのは非常に難しい。予防保全型管理の特徴は、図3に示すように変状の発生、進行度を工学的に予測し、その結果を活かして適切な時期に適切な措置を行う事である。施設に発生する変状を予測するには、これまでに発生した数多くの変状及び損傷データを分析し損傷の発生、進展のシミュレーションをするか、技術者の推論によって発生する可能性の高い損傷の供用環境を再現した解析及び実験等による損傷の発生、進展を抑止する措置の効果確認が必要となるが、いずれの方法も容易ではない。社会基盤施設は機械などと異なって、それぞれオーダーメイドで設計・施工され、異なった環境のもとで供用されるからである。もし大量生産された同一の部材で施設が構成され、似通った環境下で供用されるのであれば、かなりの精度で予測が可能であろう事は、機械関係の計画保全と対照させれば納得されるであろう。

四つ目は機能向上型管理であり、対象施設の周辺環境等が変化し、当初の機能や要求性能に加え、新たな付加価値を加えるアクティブな管理方法である。私は、「グレードアップ型」メンテナンスと呼んでいる。少子高齢化社会の到来、地球環境の保全等環境が変化する現状において、社会基盤施設を利用する人々の要求は大きく変わってきている。利用者の多く、特に納税者にとって、新たな付加価値を加える機能向上型管理は必ず必要となると考える。またこれは、資産価値を向上させる事にもなる。例えば、道路橋の場合、バリアフリー対策となる機械式昇降施設の設置、水辺空間を楽しむ張り出しテラスの設置やゆとりを感じる空間創りなどを考える事が出来る。

以上が、現在国内外で行われている主要な管理方法の概要である。ここで示したように、放置型管理や対症療法型管理では、変状が起り、致命的な事故につながる損傷の発生・

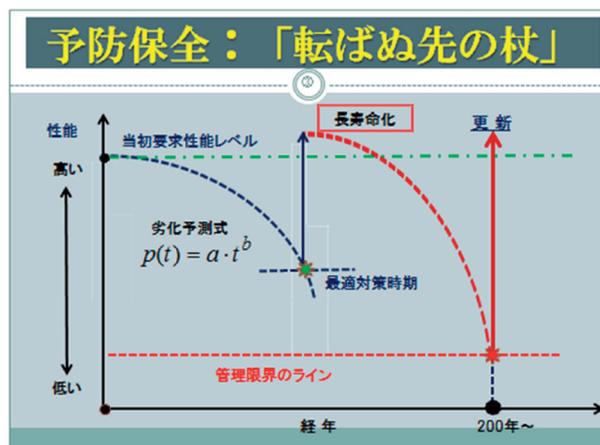


図3 「予防保全型管理」における性能と経年イメージ

進展を防ぐことは非常に困難と言える。そこで、現在国内外の多くの管理者が取り組んでいるのが予防保全型管理への転換である。予防保全型管理の重要なポイントは、変状を発見する点検、現在、次回点検時までの健全度を診断することも重要であるが、変状の原因である損傷の進展および劣化の予測と適切な措置を行う時期、特に補修・補強を行う最適な時期の決定にある。それでは、本編の主題である劣化予測と対策時期について説明する。

1 劣化予測と対策時期

施設に影響を与える損傷が発生し、変状となる時期の予測、既に発生している損傷がどのくらいの速度で進展するか、劣化が経年でどのように進展するのか、その両方を劣化予測と呼ぶこととする。私は、劣化予測の方法は、表1に示すように大きく3つに分類されると考えている。

1.1 対策時期設定型

一つ目は、対策時期設定型である。維持管理に関する関心が少ない時代の予算算出に用いられた劣化予測法である。例えば、対策時期設定型による劣化予測は鋼橋の塗装を塗り替える時期、伸縮装置の取り替え時期、舗装の打ち換え時期の決定などに使っていた。このうち工事費用が最も高額となる塗装の塗り替え時期の決定に使った事例を紹介する。昭和50年代頃までは現場の担当者が各管理橋梁の塗膜の状態と錆の発生具合を現地で確認し、塗り替え判定資料を基に判定し予算要望をあげ塗り替えを行ってきた。しかし、このような予算化の方法では、計画的な予算積み上げが出来ず、財源が落ち込むと財政当局がシーリング対象として判断し、予算減額される場合が多々あった。そこで、より計画的で、ある程度実態を表現できる対策時期設定型による劣化予測と言える劣化サイクル論を採用することとした。対策時期設定の方法としては、過去10年間の塗り替え実績から地域別に平均の塗装

サイクルを算出し、鋼橋の腐食劣化速度資料(図4参照)を作成、予算要求基礎資料とした。図4に示す資料を基にした鋼橋の劣化予測を採用したところ、過去10年以上の鋼道路橋の管理状態において腐食損傷を原因とした致命的な重大事故等が発生しなかったことから、対策データを活用して提案したサイクル論の導入に誤りは無いと判断した。その後、定期的に行った点検で得たデータを基に道路橋を構成する部材の耐用年数を調査した結果を以下に述べる。道路橋に過去に行った対策の対策部位、対策の年月および対策内容が判っていることから、対策時点の年数を算出すれば、平均補修経年数が明らかとなる。車両累積量及び荷重の影響を受けやすい事例として床版の対策サイクルについて説明する。表2に、1966年から2003年までに行われた床版対策件数と対策までの経年数の集計結果を、また図5にはこれらをグラフ化して示す。平均経年数は31.3年であり、対策数は1992年をピークに減少しているのが分かる。同様な手法で平均対策サイクル年数を求め、表3に示す。主桁が31.5年、床版31.3年、橋台が30.6年、橋脚が28.7年、支承で29.3年、高欄で27.9年と30年前後で何らかの対策を行っている事が分かる。一方、車両荷重を直接受ける伸縮装置は8.6年、舗装が8.0年と、耐用年数が主構造部材の約3.6分の1になっている。また、車両による影響を伸縮装置と舗装について調査してみると、図6に示すように大型車交通量が20,000/台未満では、7.3年～8.1年であるのに対し、20,000/台以上では5.3年と2年強対策が早めに行なわれている。同様に上部構造について材料別の対策をこれまで示した定期点検結果データから分析したところ、鋼橋が26.6年、PC橋で25.9年、RC橋で37.4年、SRC橋で51.0年となっている。

対症療法型管理を行っている地方自治体は数多くあるが、対策時期設定型の導入例は少ない。また実績を基に対策の平均値を出す考えのため、課題も多くあった。例えば、飛来塩分の多い地域、市街地、工場地帯、腐食環境が穏やかな地域、

表1 劣化予測の分類

設定法	予測要素	特徴
対策時期設定型	<ul style="list-style-type: none"> 対策実績 苦情情報 事故発生率 	<ul style="list-style-type: none"> 対策サイクル論 対策時期設定の根拠が不足
統計分析型 (統計的、確率的手法)	<ul style="list-style-type: none"> 点検結果を統計処理 	<ul style="list-style-type: none"> バラツキの少ない点検結果が必要 2度以上の点検結果が必要 予測精度は、点検データに依存
劣化理論型 (物理的手法)	<ul style="list-style-type: none"> 材料、部材別に劣化メカニズムを構築、理論予測 	<ul style="list-style-type: none"> 劣化を工学的に分析することが可能である。 対象物ごとに実験、解析実施

地域別塗装サイクル(初塗替を除く)

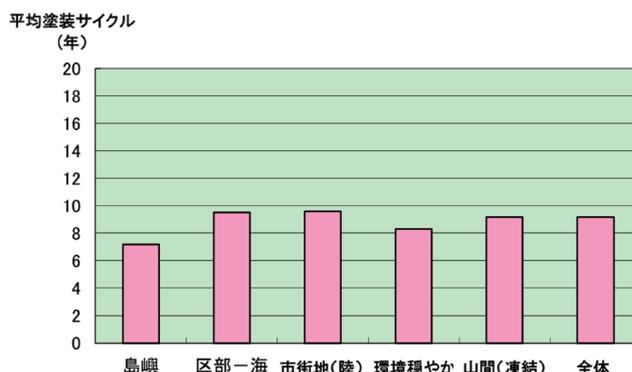


図4 地域別塗装塗り替えサイクル

表2 床版対策サイクルの変化

西暦	件数	経年数の合計	平均経年数
1966	0	0	0.0
1967	0	0	0.0
1968	1	4	4.0
1969	0	0	0.0
1970	5	64	12.8
1971	1	7	7.0
1972	3	45	15.0
1973	1	23	23.0
1974	1	13	13.0
1975	3	29	9.7
1976	3	38	12.7
1977	2	27	13.5
1978	4	58	14.5
1979	1	15	15.0
1980	9	314	34.9
1981	2	30	15.0
1982	5	151	30.2
1983	8	193	24.1
1984	7	191	27.3
1985	5	110	22.0
1986	5	116	23.2
1987	6	185	30.8
1988	9	246	27.3
1989	10	327	32.7
1990	13	350	26.9
1991	15	502	33.5
1992	19	691	36.4
1993	20	665	33.3
1994	16	606	37.9
1995	14	552	39.4
1996	18	615	34.2
1997	18	610	33.9
1998	5	165	33.0
1999	7	329	47.0
2000	3	166	55.3
2001	4	132	33.0
2002	3	124	41.3
2003	0	0	
Σ	246	7693	31.3

寒冷地、凍結防止剤散布地域の全てに対応できている訳ではない。なぜならば周辺環境別の塗り替え実績を基に地域別の劣化予測を行っていないからである。そのため、塗り替え対象でないまま舗装が進行し断面欠損状態となっている場合や、

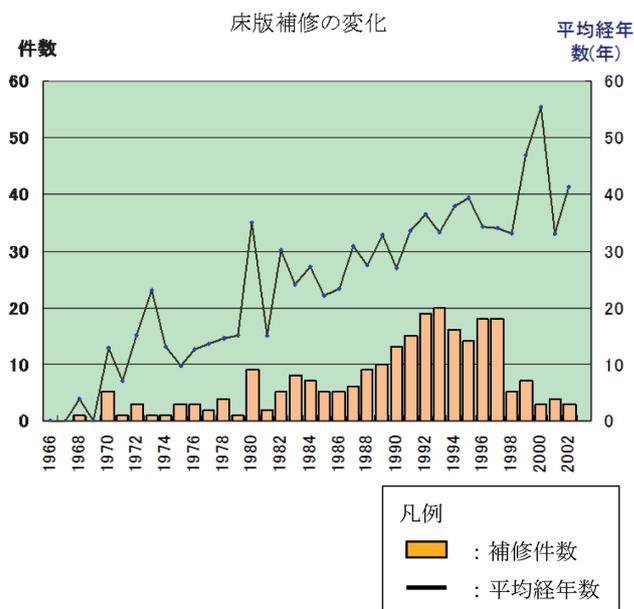


図5 床版対策サイクルの変化

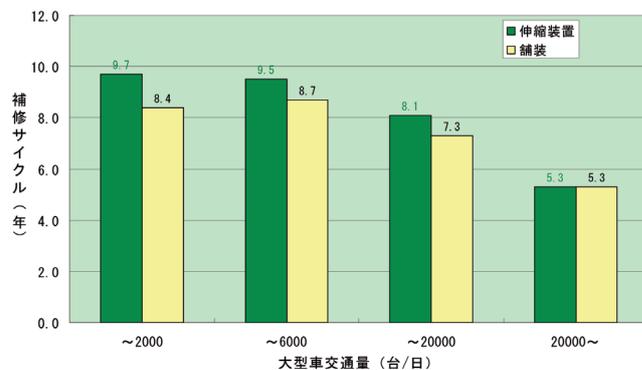


図6 大型車交通量別の対策サイクル

表3 対策実績からの個別対策サイクル年数表

部位	指標-データ数	補修件数の最も多い年数	累積率80%の年数	補修の多い年代	その間の平均値	全平均値
主桁	経年-183	25	41	1988~1997	26~38	31.5
床版	経年-247	19, 23, 25, 31	47	1989~1997	33~39	31.3
伸縮装置	サイクル-115	8	12	1992~1997	7~11	8.6
舗装	サイクル-147	5	11	1991~1997	7~9	8.0
橋台	経年-104	20	44	1991~1999	25~47	30.6
橋脚	経年-99	22, 23	34	1993~2000	23~44	28.7
支承	経年-99	25	36	1990~1998	19~46	29.3
高欄	経年-260	19	37	1988~1999	22~41	27.9

逆に塗膜がまだ活膜状態で機能しているのにもかかわらず要対策として予算要求する事例が続出していた。

このような問題を抱えながらも予算要求及び実施計画策定に対策時期設定型を採用し、管理橋梁のメンテナンスを行い始めた。しかしこれから二十数年経過した2007年8月1日に「米国・ミネアポリスの橋梁崩落事故」が発生し、見直しが全国的に始まった。当然、私の所属していた東京都も同様であった。ここで、実施効果を確認した資料がほとんど無い予防保全型管理への転換が問題となった。予防保全型管理の最も重要な要素は、先にも述べた通り対象施設に関する精度の高い劣化予測であるが、国内外に実績が少なかった。このような状況を受けて、曖昧な対策時期設定ではなく、より精度の高い劣化予測法の開発が求められる時代へ移行せざるを得なくなったのである。以下にその答えとして、図7に劣化予測手法の流れで示した、統計的手法（統計分析型）および物理的手法（劣化理論型）を説明する。

1.2 統計分布分析型¹⁾

統計的手法を用いるこの方法は、供用している施設の健全性（損傷度）を定期点検して得られたデータを基に劣化を分析することから、統計分析が機能する規模のデータ数として、精度の高い累積3回以上の定期点検結果が必要となる。集められたデータを統計処理して近似値を求めるので、データ数が多いほど予測精度が高くなる。統計的手法は、確率的手法と確定的手法に分類され、確率的手法はさらに、集計的手法と非集計的手法に分類される。確率的手法とは、ある程度の不確実性を考慮し、劣化シナリオごとに予測を行う考え方である。

国内多くの地方自治体で劣化予測式を導くために採用事例が多いのは、点検データを回帰分析、重回帰分析などで算出する集計的手法である。これによって劣化予測式を算出した事例を二つ紹介する。第一は、まず劣化予測曲線の基本式を仮定して回帰分析する方法である。この手法が採用される場合の理由には、①経年劣化傾向の把握が可能である、②分析に使用するデータ数に依存することが少ない、③施設建設

データが存在しない年（戦後の数年）における推定が可能となる、以上が考えられる。ここに示す理由を基に、劣化予測式として使われる事例が多く、学会等で発表されていた当時山口大学の宮本教授が推奨した²⁾、上に凸形状の3次式を基本式として採用し、劣化予測曲線を導いた。表4に示す定期点検結果によって得られたデータを橋梁構造別に分類し、図8に示す劣化予測曲線を求めた。同様な考え方で、腐食に影響する因子と飛来塩分の影響についても分析を行った。集計した関連データは、表5に示すように海岸から1,000mを閾値として対象橋梁の鋼桁、それも主桁の腐食に限って分類し、それを回帰分析することで図9に示す劣化予測曲線を求めた。ここに示す考え方で対策時期設定を可能とする劣化予測式を求めたが、課題も残った。第一には、基本式として仮定した劣化曲線が暫定的な関数形なので、劣化実態に適合する関数形とは言っていない事である。そこで公表された資料等や実績の中から複数の劣化予測曲線に採用されている関数形をあげ、その中から実態に適合する関数形を選定することとした。第二に、基本式として採用した劣化予測式の事例が国内で多いというだけで適切とは言えない事である。実際、紹介している事例のように十分なデータ数が現状で準備されているとは言えないからである。その理由は、最も必要なdランク（注意）、eランク（危険）データが不足している。一般的にあるレベルの維持管理が行われていれば、それらは当然少なくなるからである。また、損傷bランク（ほぼ健全）、cランク（やや注意）が多く、dランク（注意）はやや少なめとなっている。このように偏ったデータを用いて、eランク（危険）への進展を確実に予測することが可能な劣化予測方法を見いだす必要がある。それには、単純にデータを回帰分析することでは十分ではない。

第二の事例として、橋梁等構造物では採用事例が少ないが、機械保全の信頼工学、生物統計処理、人の寿命判定等に使われている余寿命の分析に適するライフタイム・データ

表4 劣化予測に使用した橋梁分類とデータ数

分類	データ数
H形鋼橋	27
アーチ橋, ランガール橋, ロゼ橋	91
I桁橋, 鋼床版I桁橋	2,222
トラス橋	51
ラーメン橋	10
箱桁橋, 鋼床版箱桁橋	849
斜張橋	10
吊橋	18
跳開橋	3
合計	3,281

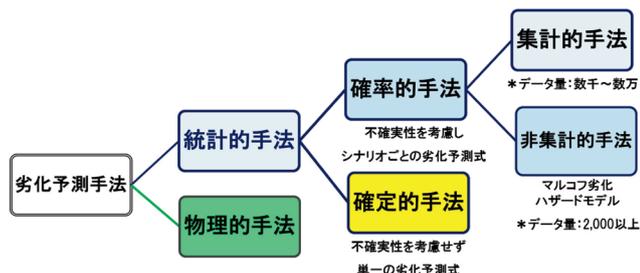


図7 劣化予測手法における統計的手法及び物理的手法の流れ

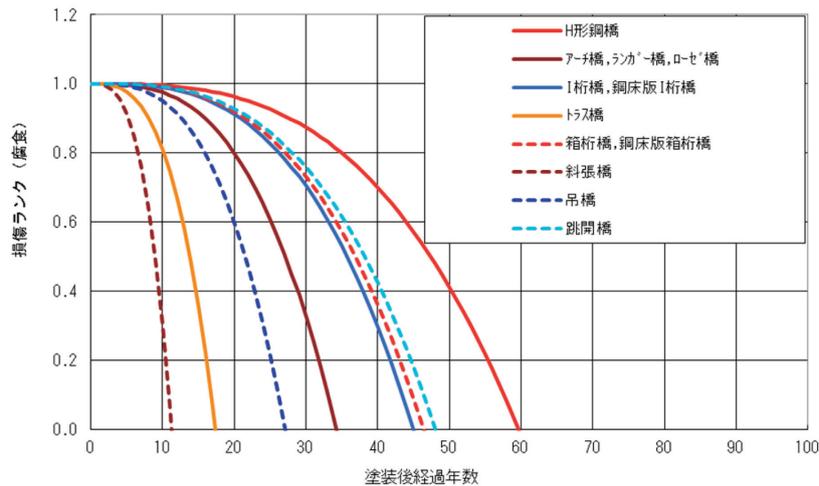


図8 損傷ランクと経過年数グラフ

表5 劣化予測に使用した橋梁数 (海岸離隔距離閾値 1000m)

分類	データ数
1000m 未満	506
1000m 以上	2,785
合計	3,291

手法の適用例を述べる。本手法では、健全度診断結果が5段階 (aランク～eランクの5段階) の5つのいずれかの値のみしかとらない不連続なデータ (離散型データ) でも処理が可能である。また、点検を行った後の将来の健全度を寿命関数によって生存確率として考慮できる。例えば、生存確率90% (90%健全、10%劣化の進展速度が速い短命タイミング) と生存確率10% (10%健全、90%劣化の劣化速度が遅い長寿命のタイミング) の寿命比較などに適用される。さらに、劣化リスクと時間の関係を進行形状パラメーターで表現する事で、時間の経過とともに劣化リスクが逡増するか、一定であるか、逡減するかが考察できる。

以上の理由から、ライフタイム・データ手法を劣化予測に採用した。限定された点検データでも劣化予測曲線を導ける手法として、寿命関数と非線形回帰を段階的ステップで行った。関数形としては、上に凸形状の3次多項式タイプ、以前に検討した線形タイプ、下に凸形状の指数タイプ、およびいずれも表現が可能な2次多項式タイプの4つを比較基本式として用いた。

まず2ステップ方式で劣化予測式を求める事とした。算定対象のデータを、竣工年次から点検年次までのライフタイムと健全度ランク別に21,352個を5回の定期点検結果から抽出し、各健全度ランクに達するタイミングを反映した寿命関数を推定した。抽出したデータの一部を橋梁の各部材と発生す

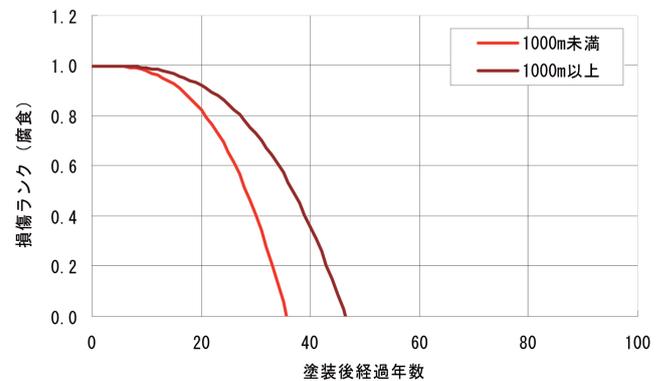


図9 損傷ランクと経過年数グラフ (海岸離隔距離閾値 1000m)

る損傷との組み合わせとして表6に示す。また表7に、鋼主桁で腐食損傷の現れた分析総数5,342個のうち、健全度ランクbランクからCランクへ到達したものの寿命関数パラメーターを示す。ここで推定した寿命関数を用いて、グループ内のどの程度の量が各損傷ランクに到達するかのタイミング情報を予測計算したのが表8である。本表で示した寿命関数から得られる50%生存確率における各bランク、cランク、dランクに達する3つのタイミング情報を用いて導いた、先に説明した4タイプの劣化予測式及び劣化予測曲線を図10、11、12、13に示す。この中から決定係数 (R^2) の高いものを最適劣化予測式とみなし、2次多項式タイプが損傷が腐食の場合の鋼主桁の推定式として最適であると結論づけた。以上で説明した劣化予測式 (劣化予測曲線) を求める考え方は難解ではあるかもしれないが、既存データの特徴と単純回帰分析の欠点を補った手法であるという面で参考にさせていただきたい。なお、本手法を活用して、材料別、部材別、損傷別の劣化予測式を導き、対策時期を設定し、中長期修繕計画の策定を行った

表6 部材-材料-損傷グルーピングと発生損傷IDデータ (主桁・塗装劣化及び腐食)

グループ No.	部材	材料	損傷	損傷IDデータ総数	ランクaの損傷IDデータ数	ランクbの損傷IDデータ数	ランクcの損傷IDデータ数	ランクdの損傷IDデータ数	ランクeの損傷IDデータ数
GR01	主桁	鋼	塗装劣化	4816	3456	779	568	8	5
				100.00%	71.76%	16.18%	11.79%	0.17%	0.10%
GR02	主桁	鋼	腐食	5342	3256	1693	325	67	1
				100.00%	60.95%	31.69%	6.08%	1.25%	0.02%

表7 bランクからCランクに到達するタイミングを反映した推定ワイブル型寿命関数

腐食劣化を説明する変数	推定パラメーター	統計的な説明力判定(p値)	腐食進行のパラメーター解釈
定数パラメーター ρ	-11.52	0.000	1%有意となっている。
損傷の進行形状パラメーター κ	2.43	0.000	1%有意となっており、東京都の主桁-鋼材-腐食の損傷がランクcに到達するリスクは、時間の経過とともに増増すると解釈できる。

表8 寿命関数から得られる各損傷ランクに到達予測されるタイミング一覧表

	生存確率S(%) グループ内のS(%)は当該ランクに達していないが、100-S(%)が達する確率。	損傷ランクbに達する将来予測年次	損傷ランクcに達する将来予測年次	損傷ランクdに達する将来予測年次
グループ内で劣化速度が速いケースに該当する	90	14.32	32.00	54.18
	80	20.73	42.42	72.24
	70	26.12	50.59	86.48
代表的・平均的なケースに該当する	60	31.18	57.89	99.25
	50	36.25	64.92	111.58
グループ内で劣化速度が遅いケースに該当する	40	41.59	72.10	124.18
	30	47.58	79.88	137.89
	20	54.90	89.08	154.12
	10	65.50	101.90	176.81

実績があり、現在でも基本的な考え方は変更が無いことを付け加えたい。最後にアセットマネジメントシステムに組み込んだ鋼主桁の腐食損傷劣化曲線を図14に示す。なお、システムに適用した図14は、損傷ランクデータの不足を補完した結果算出した予測式である。

非集計的手法は、例えば、ある健全なレベル(本誌Vol.21(2016) No.10掲載の「点検と診断」の健全度Aレベル)のグループが経年で劣化し、次のレベル(健全度Bレベル)に到達する遷移確率を求める手法である。先にも示したように集計的手法は、点検・診断結果の精度が高くないと真値とは程遠い結果となること、国や多くの地方自治体においては累積定期点検数が少ないことなどから採用が困難な事が多く、不確実性を考慮するために非集計的手法を採用している。具体

的にはハザードモデルを用い、マルコフ過程によって遷移確率を求める手法が多い。この手法は、ある想定した地域の橋梁を対象としたグループの劣化予測は可能であるが、個々の橋梁や橋梁を構成する部材別に劣化予測を行うことは困難である。その理由は、あくまで対象グループの健全度レベル平均値の推移を求めているからである。

1.3 劣化理論型の劣化予測

三つ目の手法は、劣化理論型である。これは、発生する変状(例えば、鋼材であれば防食機能の低下、腐食、疲労き裂、変形など)を使用材料や部材別に分け、それぞれの劣化メカニズムを分析し、対象としているメカニズムに適合する理論を構築、理論的に劣化予測式を算出する手法である。劣化理

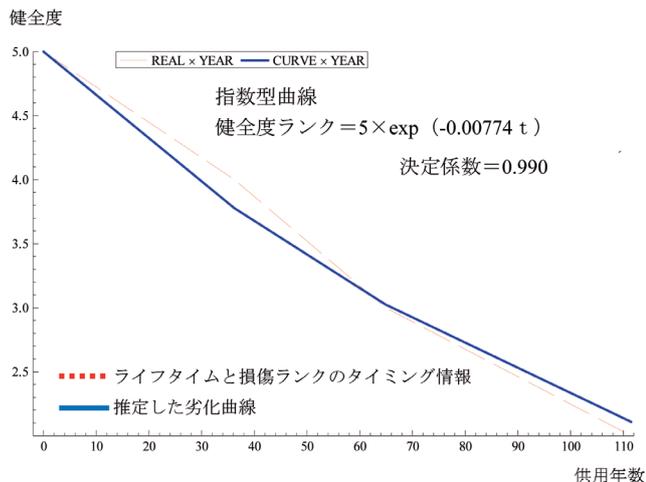


図10 ①下に凸の指数型

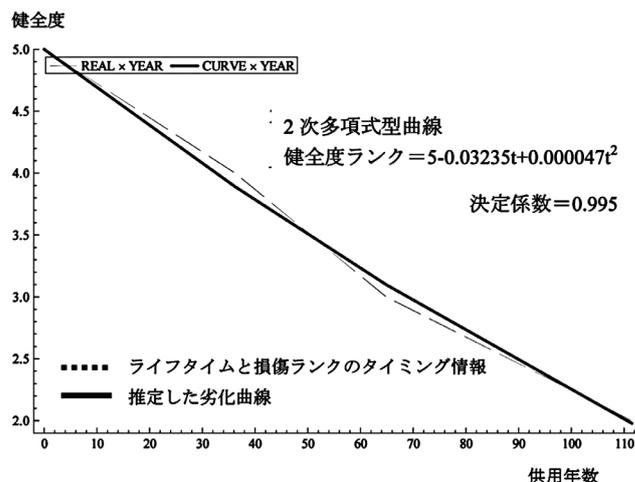


図12 ③2次多項式型

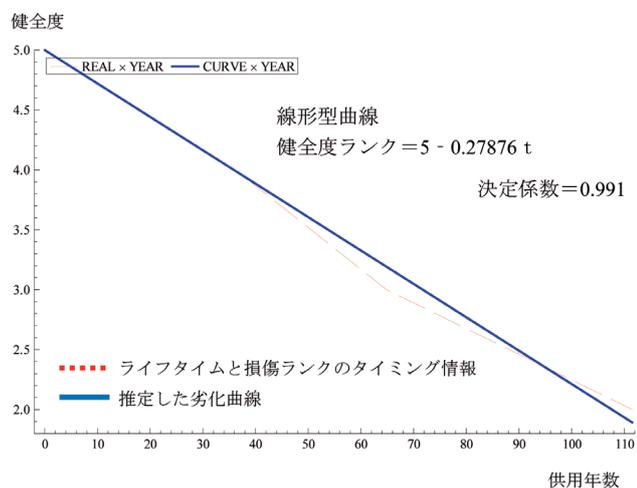


図11 ②直線の線形型

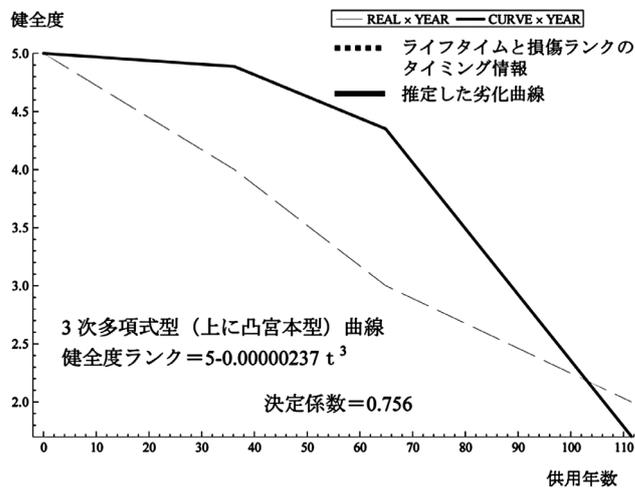


図13 ④上に凸の3次式型

論型による劣化予測式の算出には、第一になぜ劣化が発生するかを解明することが必要となる。例えば、鋼材の腐食であれば、道路橋の腐食は、湿食現象で、常温状態において水と酸素の存在下で生じる。これは、鋼(鉄)がイオン化して水の中へ溶解する電気化学的反応である。腐食反応は、アノード反応とカソード反応が必ず等量で進行し、片方の反応が抑制されることになると自動的に他方の反応も抑制される結果となる。腐食の劣化メカニズムがわかれば、対象施設及び構成部材別の周辺環境を再現した環境を実験室等で作り出し、時間を短縮する手法としての暴露試験によって経年と腐食の関係を導き出し、得られたデータを分析することで劣化理論式を算出することが可能である。また、鋼材に発生する疲労亀裂も同様である。疲労亀裂発生メカニズムは、対象となる施設及び詳細構造(応力集中部、例えば溶接部など)に対し、疲労亀裂の発生環境となる作用荷重と荷重の繰り返し数を導

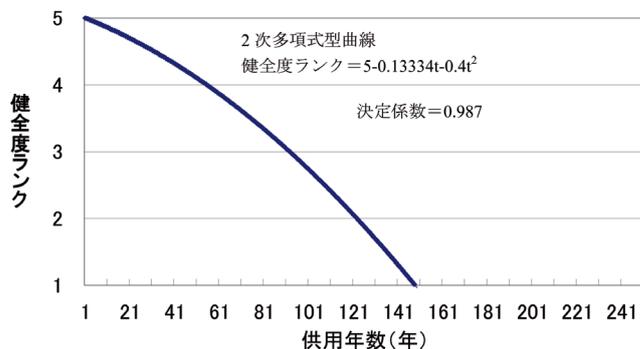


図14 鋼主桁で腐食損傷を対象とした劣化予測式及び劣化予測曲線

くことである。それには、腐食と同様に、疲労試験機によって同様な疲労環境を作り出し、劣化理論式を算出すればよい。例えば、疲労試験機によって材料別、詳細構造別及び継手別のS-N線図を求め、疲労寿命予測する方法である。こ

ここに劣化理論型の事例を二つあげたが、同様にコンクリートの劣化事例として中性化や塩害などがあるが、いずれも同様な手法で劣化理論型による劣化予測式の算出が可能である。劣化理論型の課題は、対象施設及び詳細構造を再現するモデルを如何に創りだすかがポイントとなる。

1.4 劣化理論型による寿命判定事例

現状において、施設の寿命を予測する手法は、種々の統計分析型手法と劣化理論型を比較すると、劣化理論型の方が予測精度等を考えると優位である。技術者の持てる技術力や経験に頼る点検・診断データの信頼性、ビッグデータ分析時代の到来といえどもデータ数に不安が残る統計分析型と比較して、室内及び暴露試験等を基本とする劣化理論型の方が信頼性は高い。そこで、実際に供用中の道路橋を対象に行った劣化予測式に基づく余寿命判定を事例として紹介する。

ここで紹介するのは、約50年経過したプレストレストコンクリート橋（写真2）での寿命予測を行った事例である。架け替えるか補強等によって対策を行うかの検証が必要となった人道橋で、飛来塩分が無く、凍結防止剤の散布もない供用環境としては良好な地域に架かっていた。竣工図書によれば、設計基準強度は下部構造が $\sigma_{ck} = 210\text{kgf/cm}^2$ 、上部工主桁が $\sigma_{ck} = 350\text{kgf/cm}^2$ である。外見から施工不良が認められなかったことなどから、コンクリートの中性化のみが劣化予測の対象とされた。土木学会等の公表された資料によると、中性化深さは①式に示すように中性化期間の平方根に比例するとしている（劣化理論式 \sqrt{T} 則）³⁾。

$$y = b\sqrt{t} \dots \dots \dots (1)$$

y : 中性化深さ (mm)、t : 中性化期間 (年)、
b : 中性化速度係数 (mm/)

本式の重要なファクターは、中性化速度係数をどのように決定するかである。そこで、現橋において中性化試験（ドリ

ル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化試験法)を行い、測定結果から上部構造および下部構造の中性化速度係数を算出した。下部構造の中性化深さは現地計測した結果、15.0mm（平均値）であり、中性化速度係数は、 $b = y/\sqrt{t} = 15.0/\sqrt{45} = 2.24$ となった。また、上部構造の中性化深さは8.6mm（平均値）であり、中性化速度係数は、 $b = 1.28$ となった。コンクリート構造物の中性化による影響は、鉄筋腐食であることから、主鉄筋のかぶり厚が寿命予測を行う時点で重要な要素の一つとなる。下部構造の鉄筋かぶりは竣工図書より59mmとした。上部構造は設計図書を不幸にも紛失していたので、PC床版構造（支間長が10mを超える）であることから設計基準を基に35mmと推定した。なお、中性化による鉄筋腐食計算においては施工誤差を考慮するものとし、下部構造で15mm、上部構造で5mm見込んで安全側に算定した。ここで、中性化残り10mmを寿命の判定基準として、上部構造で $y = 1.28\sqrt{t}$ 、 $\sqrt{t} = (30.0 - 10.0) / 1.28 = 15.6$ となった。下部構造についても同様な計算を行うと、残存寿命が、183年と上部構造と比較して15年短い結果が得られた。なお、図に示す理論推定式は、コンクリート標準示方書に示されている使用コンクリートの性状によって中性化を算出する $y = R(-3.57 + 9.0W/B)\sqrt{t}$ によって求めた値をグラフ化（図15参照）したものである。そこで、対象橋梁は、中性化がこのまま進行しても余寿命が十分であると判断して補強案を選択し、耐震補強などを行って現在も供用している。

1.5 対策時期

社会基盤施設は供用を開始すると経年で種々な損傷や劣化が発生し、変状となって顕在化する。この様な状態を放置すると、当初設定した寿命に到達する前に供用できなくなったり、事故を起こしたりする。補修や補強はこの様な事態を回避するために行われる。変状が顕在化すれば、材料や部材に



写真2 市街地公園を連絡するプレストレストコンクリート橋

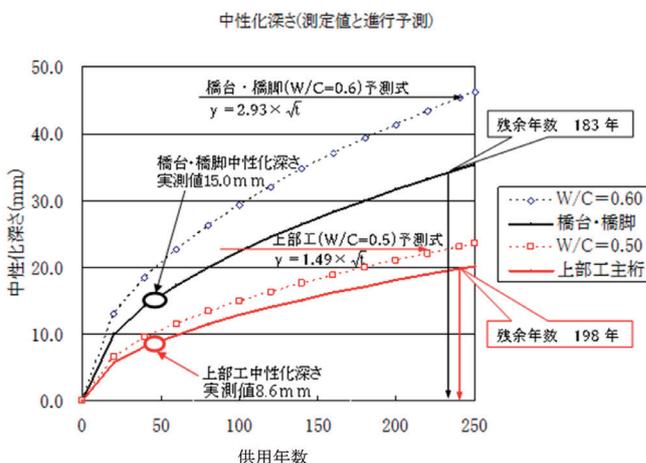


図15 中性化による劣化予測事例

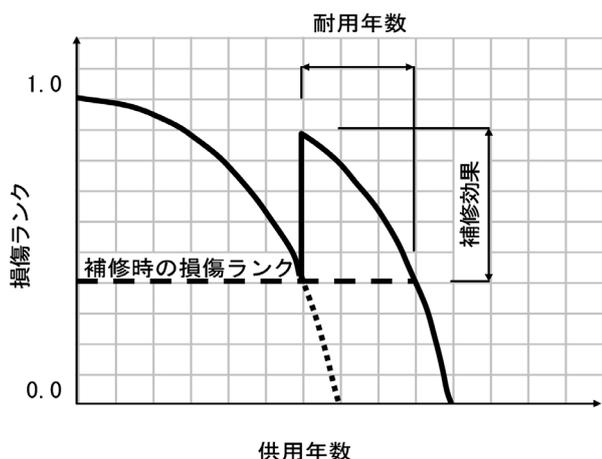


図16 中性化による劣化予測事例

損傷や劣化が発生している事になる。これらが僅かしか発生していないときに補修や補強を行うと過剰対応となってしまう。一方で、早期発見、早期対策が必要な損傷もある。鋼主構造の疲労亀裂や座屈などがそれに該当する。変状となって表れても直ぐに構造体として致命的とならない損傷や劣化の場合は、先に説明した劣化予測式を活用して、経済的に好ましい時期に対策を行うことが必要である。補修や補強対策を行えば、施設の性能を向上させる効果が得られる。図16に、供用後の何時の時期に対策を行うかでその後の保有性能が大きく異なった結果を示す。

ここで、算出した劣化予測式を基に対策時期を検討し、予防保全型管理計画を策定した中で鋼橋塗装の塗り替えを事例に概要を説明する。鋼橋の部材寿命曲線は、基本的に過去に6回行った定期点検データを分析、右下がりの曲線（塗装劣化の曲線）を用いることとした。本劣化予測曲線は、これまでと同様な標準的なレベルの維持管理を継続して行っているとの条件で推定した結果を使用して求めている。鋼主桁の劣化予測式は②式となる。

$$y = 5 + at^2 + bt \dots\dots\dots(2) \quad (a : -0.000094, b : -0.013334)$$

鋼主桁の場合、先に示したサイクル論に基づく維持管理を継続的に行っていると仮定すると近似した寿命が建設後150年であることが明らかになる。ここで、防食機能の劣化式から好ましい塗り替えレベルを算出(LCC)したところ、健全度レベルがbの段階で塗り替えを行うことが最も効果的である

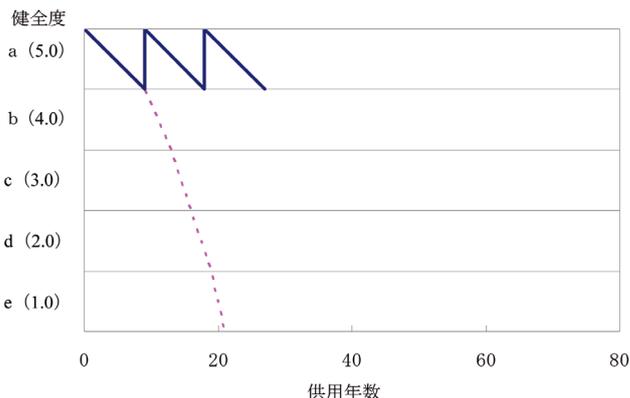


図17 塗り替え塗装による健全度レベルの推移

結果となった。塗り替えをbレベルで行うと、塗膜としての性能はすべて図17に示すように当初のaレベルとなる。ここで重要なのは、bレベル以下で塗り替えた場合、部材の一部がaレベルに性能回復できなかつたり、aレベルに向上させるために数倍の費用が必要となる事である。さらに、防食機能を常時回復させていれば、定期点検結果から算出した耐用年数を向上させる効果も期待できる。以上が、劣化予測式を参考に対策時期を決定し、計画策定した概要である。

劣化予測を行うことは、予防保全型管理を推進するうえで必要不可欠である。しかし、現状の現地点検の方法や健全度(損傷度)診断結果の内容を検証すると、まだまだ精度的に大きな課題を抱えていると言わざるをえない。現在進められている点検・診断データの分析に基づく劣化予測式についても、その成果は数年後でない精度が高い予測式が導けたとは多くの組織で考えられていない。先にも述べた通り、精度の高い劣化理論型も数多くあるものの劣化現象の一部に適用されるにとどまっている。今後種々な損傷や劣化に対し数値解析や実験等によって材料、構造、環境等に適合する劣化予測手法が提案されることを望むものである。

参考文献

- 1) 東京都建設局：橋梁の管理に関する中長期計画, (2009. 3)
- 2) 宮本文穂, 串田守可, 足立幸郎, 松本正人：土木学会論文集, 1997 (1997) 560/VI-34, 91.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書「維持管理編」

(2016年8月16日受付)