

土木のアセットマネジメント技術における寿命予測と費用平準化のデファクト標準の原型*

Prototypic De Facto Standard Technique Forecasting Lifetime and Smoothing Lifecycle Cost For the Civil Engineering Asset Management

安野貴人**

By Takato YASUNO**

1. 土木のアセットマネジメント技術の動向

現在、管理者が土木構造物のアセットマネジメント技術（Civil Engineering Asset Management、以下、「CEAM 技術」と略す）を導入する際に、ライフサイクル費用（以下、「LCC」と略す）最小型の仕組みが主流である。第一世代の学術的研究は、「アセットマネジメント研究のフロンティア」特集¹⁾に端を発している。筆者は、道路橋の劣化予測、舗装のハザードモデル、インフラ会計等の論文に多いに刺激を受けた。それ以来、道路橋、舗装は比較的データベース整備が充実した領域での産学協働による学術的研究が目立っている。自治体と大学の協働により長寿命化の行動方針を立案し、各工種に適する実務的なガイドラインと点検要領を作成・導入し、それを情報公開し維持管理行為の説明責任を積極的に果たしている例²⁾もある。地方自治体を含めた産官学の協働で、アセットマネジメント導入に挑戦する動き³⁾も活発化し、先進自治体を例に、システム構築にむけた基本的な考え方が議論された入門書も出版され、既往の実務的知見の共有に寄与し、技術勉強会の素材にも適している。道路保全技術センターは、地方自治体の道路橋管理者への普及を見据え、技術研究の成果を点検台帳データベースと LCC シミュレータのフリーソフトを添付し、ハンドブックを出版⁴⁾した。寿命が短い機械・設備では、国内各地方の河川ポンプ設備等の管理者が協働で、国内実績に基づく標準的な対策年次の目安を示し、点検・整備・取替え・修繕のマニュアル（案）⁵⁾が示された。

最近、国土交通省は、社会資本整備重点計画⁶⁾

*キーワード：アセット技術標準、寿命予測、費用平準化

**正員、博士（工学）、株式会社ニュージェック技術開発グループ（東京都江東区新大橋一丁目12-13、TEL03-5625-1822、FAX03-5625-1870）

で、道路橋・下水道施設・河川処理施設・港湾施設等の長寿命化計画の策定率を3年後の2012年度に100%とする数値目標を掲げた。この他、水産庁は、漁港施設の機能保全計画の作成要領⁷⁾を示した。厚生労働省は、水道事業のアセットマネジメントの手引き（案）⁸⁾を作成した。

これらを背景に、土木構造物の管理者が CEAM 技術を用いた新たな維持管理の仕組みを導入することが更に加速していくと考えられる。土木構造物の長寿命化という緊急課題に対応するため、土木技術者への CEAM 技術の開発と普及に期待が高まっている。技術開発の重点課題は、CEAM を導入する際に技術体系の中核を担うツールボックスを CEAM 技術として標準化し、維持管理の実務に普及することである。筆者は、CEAM 技術のなかで、更新・補修の対策時期を予測する技術と LCC を平準化する技術が中核を成すと考える。以下、2. では、寿命予測の開発軸を、3. では、費用平準化の開発軸を、4. では、今後5年間の CEAM 第二世代の技術開発に言及する。

2. 寿命予測の開発軸

(1) 寿命予測の目的・用途と開発フェーズ

港湾・道路・上下水道・河川・電力土木等の横断的な経験から、寿命予測技術の開発軸を考察する。第一に、施設管理者が求める寿命予測の目的・用途をとって、①ベースライン劣化曲線の作成、②条件別の劣化曲線作成、③劣化曲線の更新・修正という3つのフェーズを設定できる。①では、経過年数に関して一定か、逡増か、逡減かという単調な劣化曲線の形状分析、経過年数の何乗に比例するかの劣化速度の分析が開発課題である。②では、耐久性の異なる材質、劣化速度が異なる使用環境、塗装や補修の対策の履歴などの基本線を複数のグループに書き

分けるための付加情報が整備できれば可能となる。異なる劣化速度に応じて条件別に対策時期をずらし、維持管理シナリオの適時性を高めるために有用である。③では、点検・測定を繰り返し、管理者が既定の劣化曲線を更新・修正するために有用である。劣化状態の膨大なデータを蓄積した状況で、効率よく劣化傾向や対策時期の予測情報を推定する。①②で得た劣化曲線は、施設の劣化が進行するたびに、経年変化するため予測誤差を修正する必要がある。数十年かけて全数点検を待つて寿命予測することは実践的でない。代表的な使用環境に焦点をあて既存データから現代の寿命予測の最善を尽くす必要がある。

（２）点検・測定データ蓄積の壁

第二に、寿命予測に必要なデータ使用環境として、点検・測定データの蓄積の壁の問題がある。まず、点検・測定データの内容は、目視の複数ランクによる離散データよりも、数量を詳細測定した連続データが望ましい。連続データの方が客観的な測定データが得られて、予測精度の面で有利である。判定ランクデータは、多時点にわたり、同一の尺度を有する人が判断するとは限らず、実状と判定に乖離が生じる場合がある。この判定バイアスの問題を抑えるため、視覚的な損傷事例集の整備と点検履歴情報の引き継ぎ、点検結果の時系列照査が課題となる。

点検・測定データの蓄積数量については、データ数量が限られる場合、劣化曲線の基本線でさえ、そのパラメータ推定が不安定な結果となる。パラメータが多く、過度の精密化は安定した推定結果を得ることを困難にする。実用に耐える寿命予測モデルは、必要最小限のパラメータを含み、劣化傾向を分析するため豊富な表現力を有し、簡素で扱いやすいのが適するが、ワイブル分布の特定化は優れている。

例えば、港湾鋼矢板の板厚測定データはダイバーが潜水測定し、詳細調査に多くの費用・労力を要する。また、上下水道の地下埋設管路では劣化調査の費用・労力が多大となる。費用の問題は、局所的に一部の管理者が負担するより、広域的に使用環境を共有する複数の管理者が費用分担し、統一的な実施要領に基づく協働点検と相互利用が課題である。国内地方間の経験共有、広域行政・技術協会など持続的に連携した協働の取り組みが求められる。

3. 費用平準化の開発軸

（１）維持管理予算の最適化技術の開発

1960年代の高度成長期に建設したものが一斉に老朽化し、地域の財政を圧迫し始める。世代をこえて公平な負担を均等配分するため、先見性を備えた長寿命化を実現する意図で、長期の予算計画立案において費用平準化を行う。以下では、港湾・道路・河川・電力土木等の多様な経験から平準化技術の開発軸を整理する。対策期間のスケールから、①50～100年程度の長期生涯の予算サイクル推移予測、②10～20年程度の中期の集中投資戦略立案、③3～5年程度の短期の事業実施計画策定という3つのフェーズが考えられる。費用平準化技術は、①生涯予算サイクルの推移予測に必要である。この長期見通しのもとで、補修・更新が集中する期間を特定し、②中期投資戦略において、相互に近接する施設単位は一括整備するなど、中期的にコスト効率よく同期化する方策が課題となる。費用平準化のためには大規模施設において分割整備した方がよいが、近接同期化のためには一括整備した方がよい。長期の平準化と中期の同期化は完全に両立しない。段階的に、長期の公平な負担をめざし、中期のコスト効率を高めることが課題となる。③短期事業実施では、緊急性の高い施設を対象に、補修・更新の対策要否を判断するため詳細調査および実施設計が必要となる。③事業実施フェーズは従来から行われてきた整備行為に類するが、中長期の予算と戦略を前提にした先見性を備える点で優れている。

（２）対策時期の割当て問題とコストテーブル

長期に発生する費用のピークを平準化する目的は直感的にわかりやすく、数十の対象施設は思想的に計算できる。管理単位の補修・更新が発生する年度において、大小異なるコストの固まりのブロックが積み上がる。ピークの山を崩すため、費用が発生していない空白時期を探索し、その前後に許容範囲内で補修・更新の対策時期を割り当てる。縦軸に施設単位のID番号を表示し、横軸に計画期間の今後の年度を表示したコストテーブルを作成し、行列の各セルに補修・更新の費用を埋める。計画対象の施設数が多くなると、複雑な多時点の線形和の数え上げ

となる。作成時間と正確さの問題を克服するため、多数の施設の制約条件をふまえて最適解を探索する数値計算が必要となる。

（３）費用平準化の目的関数

費用平準化における目的関数は、各年度での予算の超過・余剰の総和であり、これを最小化するような補修・更新計画が解として期待される。目的関数は、線形和、残差平方和等を設定し、整数計画問題・２次計画問題として扱える。平準化の目的は、各年度における予算の超過あるいは余剰のペナルティ量を最小化することにある。予算の超過は管理者の財政を圧迫する状況を招くのに対し、予算の余剰は繰り越せば良いので、予算の超過の方が相対的に大きいペナルティを与えるべきである。長寿命化において、すでに補修・更新の対策時期を過ぎた老朽化施設に出くわすことがよくある。予算の超過は、まったく許容できない訳ではなく、対策時期を過ぎた老朽化施設の緊急対策期間では手厚い予算を積み増す方策もありえる。

（４）費用平準化の操作変数と解法

費用平準化の目的関数を改善し、最適な計画を探索する操作変数は、①施設全体の異質なグループ分轄、②個別施設への維持管理シナリオの切り替え、③各年度における補修・更新の対策時期を許容範囲内で調整することが考えられる。①異質なグループ分轄では、劣化速度や対策単価が異なるため、時間と費用の軸方向に分散し、同質なグループとして計算するよりも、費用ピークの一定の緩和が可能となる。②維持管理シナリオの切り替えでは、個別施設に適用できる予防保全型・事後保全型・更新型等の実行可能なシナリオを切り替える。各施設でのシナリオ切り替え操作によって、費用平準化に一定の改善をもたらす。個別の施設ごとに、シナリオの条件となる劣化速度と対策単価を切り替えるため、グループ一律のシナリオ適用よりも、費用発生の分散に寄与する。しかし、シナリオ設定に応じて生涯の対策時期を同時に定める点で柔軟性に乏しく、シナリオ切り替えのみの操作にも限度がある。③各年度の対策時期の調整では、各施設に割り当てたLCC算定のシナリオを規則的に守りながら、補修・更新の

それぞれの対策時期において許容範囲内でタイミングを調整する。直接、各施設の対策時期を許容範囲内の組み合わせで独立に調整する点で、３つの操作法のなかで最も柔軟性に優れている。時期調整の前後方向は、第三者被害の多い施設や災害から生命や財産を守る防災施設において、前倒しが推奨される。後方の許容年数は、過度の長寿命化、対策の先送りに陥る恐れがある。人命に影響のない施設や早期に修復できる施設では、後方シフトもありえるが、最後に残された手段といえる。前倒し許容年数の範囲の幅は、広すぎると余寿命を残して過度に早すぎる無駄な事業となり、長寿命化に反する。対象施設の生涯サイクル年数に照らし、10%以内に抑えるべきと考える。10～30年の耐用年数では、前倒し許容年数は1～3年とする。

解法としては、①操作変数の組み合わせの総当たりし、その中で目的関数を最善のものを抽出する総当たり法、②シナリオ規則を制約条件とした目的関数を最善にする解を探索する数値計画法が考えられる。①総当たり法は、問題の規模が計算機で算定できる範囲内で可能である。問題の規模を与える計画条件は、計画期間長、施設の単位数、許容年数の調整幅である。大規模の問題では、物理的に計算できたとしても工期的に不可能なほど長時間となることもある。このため、大規模な離散計画の原問題として定式化し、実装可能な整数計画問題に緩和する解法の開発が課題となる。

4. 今後の技術開発にむけて

本稿では、最近活発化している長寿命化計画の策定を実践的に牽引するため、CEAM技術の中核を担う寿命予測とLCC平準化に着目し、技術の開発軸を整理した。今後の技術開発課題に言及する。CEAM技術の標準化においては、国・都道府県・市町村が管理する土木構造物の長寿命化計画策定を加速させるため、簡素な原型で対象地域に適用しやすい頑健な導入手法が求められる。管理対象の中で重点施設を絞って部分最適化する手法から、大量の広い範囲で全体最適化する手法が求められるだろう。この場合、大量のデータを用いた寿命予測と大規模な長寿命化問題のLCC平準化が必要で、数値計算

の時間が大幅に伸びることが想定されるため、計算速度の改善が課題となると考える。

点検・モニタリングにおいては、経年劣化を対象とした劣化曲線の基本線作成が定着し、繰り返し点検データの蓄積に伴い、既定パラメータを修正し対策時期の予測精度が向上すると期待される。単調な増減曲線ではなく、供用期間の時期によってピークや複数モードを有する複雑なハザード形状¹⁰⁾を分析できるものとする。これによって、より適切な補修時期の設定とコスト効率のよいタイムリーな更新時期の決定を支援できると考える。

一方、突発的な劣化発生は予測困難で発見が遅延すると第三者被害が甚大になる恐れがある。この場合、連続監視データの測定により、異常な変状をいち早く捉えて突発劣化を発見するヘルスマニタリング¹¹⁻¹²⁾の導入が求められる。更新が集中する時期に、財源制約のため劣化期の土木構造物を我慢して供用持続する場面も少なからず起こりうると考える。被害抑制の効果に見合うモニタリング費用の投入を確認する必要がある。

リスクの反映においては、長寿命化に伴い劣化期に想定される第三者被害の想定と劣化イベント発生確率の予測といったリスクの視覚化が求められる。管理者や利用者が土木構造物の劣化によってさらされるリスクの指標化を行い、膨大な数の施設を科学的に分類し、対策の優先度をより効果的に決定支援できると期待される。大地震の頻発や気候変動に伴う豪雨や突風の局所的発生は、当初の管理水準の見直しや土木サービス継続と早期復旧等の信頼性維持を求めよう。

インフラ会計においては、維持管理計画の策定普及に伴い、長寿命化実現に要する資金調達を円滑化するため、中長期予算計画に対応した更新会計や繰延維持補修会計の運用が求められる。各年度予算の基本線と引当金の設計において、LCC平準化技術の活用が期待される。

市民参加においては、自らの地域のインフラは自らの地域で守る意識を啓発し、公共性の低い住民生活に密着した土木構造物を対象に、点検や監視通報の協力を求めることも考えられる。行政がすべて管理するよりも市民と協働で維持管理の方が管理水準・費用・長寿命ともに有利な場合に協働の仕

組みづくりが課題となる。

今後、第二世代の学術的な知見に刺激を受けながら、実践的な技術開発の取り組みに貢献できれば幸いである。

謝辞：株式会社ニュージェックで実践開発に携わる機会を頂いた。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林潔司他：アセットマネジメント研究のフロンティア、土木学会論文集No. 744/IV-6 1、pp. 11-75、2003.
- 2) 静岡県建設部：土木施設長寿命化行動方針（案）本編・実践編、舗装・橋梁・トンネル・水門・係留施設・斜面施設等の各工種ガイドライン、2004～現在.
- 3) 土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦、技報堂出版、2005.
- 4) 道路保全技術センター：道路アセットマネジメントハンドブック、鹿島出版、2009.
- 5) 国土交通省河川局：河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル（案）、2008.
- 6) 国土交通省：ストック型社会への対応、社会資本整備重点計画2008～2012.
- 7) 水産庁：水産基盤ストックマネジメント事業（漁港施設の機能保全計画）、2008.
- 8) 厚生労働省：水道事業におけるアセットマネジメントに関する手引き（案）、2009.
- 9) 安野貴人：橋齢と損傷ランクデータを用いた損傷発生タイミングと余寿命の予測、社内研究、2005.
- 10) 安野貴人・保田敬一：土木構造物の維持管理と劣化進行のハザード形状、土木学会応用力学論文集Vol. 10、pp. 1019-1026、2007.
- 11) 安野貴人：構造ヘルスマニタリングにおける管理指標の原型と設定手法の提案、土木学会328委員会主催コンクリート構造物のヘルスマニタリング・シンポジウム、2007.
- 12) 安野貴人：点検から監視へ—構造物のヘルスマニタリングによる劣化予測の役割、セメント・コンクリートNo. 732、pp. 13-19、2008.