

地盤工学分野における維持管理とアセットマネジメントの取り組み

Maintenance and Infrastructure Asset Management on Geotechnical Engineering

大 津 宏 康 (おおつ ひろやす)

京都大学大学院教授 工学研究科

表一 1 予算構成 (平成18年度統計)¹⁾

| 区 分 | 内 訳 | 比 率 |
|--------|---------------------------|-------|
| 義務的経費 | 人件費, 扶助費, 公債費 | 51.8% |
| 投資的経費 | 普通建設事業費, 災害復旧事業費, 失業対策事業費 | 16.6% |
| その他の経費 | 物品費, 維持補修費など | 31.6% |

1. はじめに

日本においては、社会基盤構造物の多くは昭和40～50年代の高度経済期に建設されてきた。このため、同時期に建設された社会基盤構造物の経年劣化が顕在化しつつある中、維持管理の重要性が唱えられて久しい。このような状況の下でも、地盤構造物の維持管理は、舗装および橋梁に比べて、必ずしも十分には実施されて来なかったと指摘されている。しかし、この維持管理が不十分であったという課題は、実際には地盤構造物に限定したのではなく、社会基盤構造物全般に当てはまるものである。その理由としては、予算構成に起因する課題、および維持管理を実施するに当たっての意思決定問題としての不備等が挙げられるであろう。

まず、予算構成に起因する課題としては、予算分類における社会基盤構造物の維持管理費の取扱いが挙げられる。例えば、地方自治体における予算構成は、表一1に示すように義務的経費、投資的経費およびその他の経費に区分される¹⁾。なお、その他の経費に分類される「維持補修費」は、本総説で対象とする社会基盤構造物の維持管理ではなく、光熱水料費あるいは建物の維持修繕費のように、事前に費用の発生が確定されているものが該当する。そして、表一1に示す予算構成で、舗装、橋梁、トンネルの調査費、点検費、設計費、補修費などは投資的経費に区分される。また、地盤構造物の代表である道路斜面の点検、調査・設計、事前対策の費用は、舗装、橋梁、トンネル等の道路施設の道路補修費とは別枠で災害防除として区分される²⁾。このような背景から、地盤構造物のみならず社会基盤構造物全般に対して、新設に比べて維持管理には十分な予算が充当されて来なかったといえる。

次に、維持管理を実施するに当たっての意思決定問題としての不備とは、維持管理は社会基盤構造物を新設することに比較して、多様な判断を要することに起因するものである。例えば、高度経済期のように、足らざるものを建設することの意思決定は比較的容易になされる。しかし、社会基盤構造物の経年劣化が顕在化しつつある状況においても、構造物の維持管理によりその延命化を図るか、あるいはスクラップ・ビルドで更新するかは、極めて困難な判断である。加えて、その判断を客観的に実施し、かつ透明性の高い説明を実施して合意を得ることは困難である。このような課題の下では、地盤構造物

に限らず、社会基盤構造物全般の維持管理では、災害が発生した後に事後的に補修・更新するという「事後保全」の対応が図られてきたものと解釈される。

上記の課題を解消し、社会基盤構造物の維持管理・補修・更新を合理的に実施する方策として、近年インフラ構造物のアセットマネジメント³⁾ (以下、アセットマネジメントと称す) という概念が導入されてきた。なお、一部には、アセットマネジメントを維持管理の高度化ととらえるような動きもあるが、その基本概念は、アメリカ連邦道路局 FHWA の定義⁴⁾ に示されているように、中長期的な構造物の維持管理において、工学的知識にビジネス・経営的感覚を加え合理的に意思決定を行う方法論ととらえるべきである。

ただし、現状でアセットマネジメントの概念が具体的に適用されつつあるのは、主として舗装・橋梁等の人工構造物である。これに対して、地盤工学分野では筆者⁵⁾ が指摘してきたように、アセットマネジメントという概念を適用することの必要性および有益性について、必ずしも統一した認識が共有されているとは言えない。

このような状況を踏まえて、本総説では地盤工学分野におけるアセットマネジメントの取り組みの現状について述べるとともに、その将来展望について解説を加える。

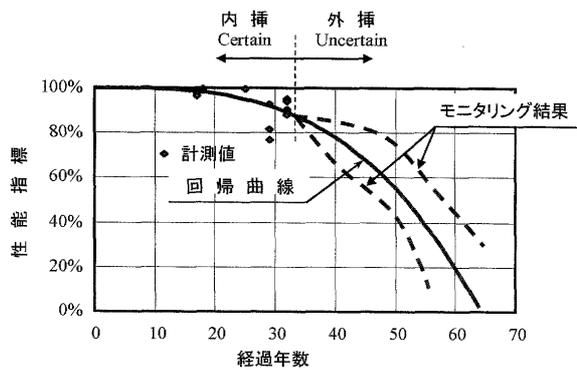
2. アセットマネジメントの基本概念および課題

社会基盤構造物のアセットマネジメントにおいて必要となる検討要件は、以下のように要約される⁶⁾。

- ① 構造物の性能、機能水準の現在状態の規定
- ② 構造物の性能低下に対する将来状態の予測
- ③ 構造物の性能低下過程のモニタリング
- ④ 費用対効果の評価を含めた適切な箇所およびタイミングでの維持・補修・更新のルール化

まず、第一段階では、目視点検・計測等により構造物の現在状態を表す性能指標を設定することが必要となる。

総説



図一 性能低下曲線のモデル化に関する課題

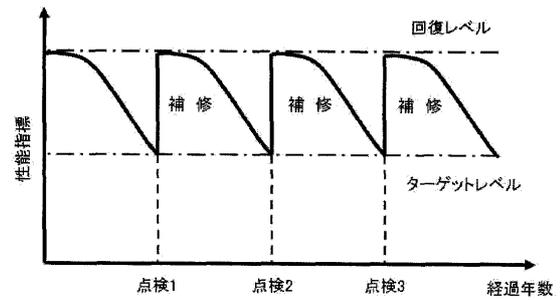
そして、第二段階では、設定した性能指標の性能低下に関する将来の状態を予測することが必要となる。ここで、将来状態の予測には、図一に示すように性能指標に対する回帰曲線を用いることが一般的である。しかし、図一に示すように、回帰曲線は本来内挿としては意味があるが、将来状態の予測に適用することは外挿になるため、その推定精度に課題がある。この課題を解決するためには、モニタリングがその妥当性を担保するための有効な手段となる。すなわち、図一において、モニタリング結果が、推定した回帰曲線より上に位置した場合には推定値は安全側を、一方回帰曲線より下に位置した場合には推定値は危険側を与えることになる。

なお、図一に示す模式図では、性能指標が舗装でのラフネス指数 IRI のように連続量として与えられる例を示したが、一般的には目視点検で得られる情報は、ランク分け・等級分けに相当する離散値として与えられることが多い。このような離散量に基づく構造物の性能低下過程を統計的にモデル化する代表的な手法としては、マルコフ過程が挙げられる。このマルコフ過程を用いた推定手法は、これまでに舗装・橋梁の維持補修問題に適用されている^{7),8)}。

次の段階において、構造物の性能低下に対する将来状態の予測に基づき、ライフサイクルコスト（以下、LCC と称す）を算定することになる。LCC は、具体的な補修戦略を考慮し、点検費用および構造物の維持補修・更新に要する費用等の和として算定される。一般的には、LCC を算定する上でのパラメータは、図二の概念図に示す補修を行う基準となるターゲットレベル、回復レベルおよび点検間隔となる。そして、算定された LCC を判断指標として、最適な補修方法あるいは最適補修間隔が選択されることになる。

3. 地盤構造物へのアセットマネジメントの適用事例

2. に示したアセットマネジメントの基本概念を地盤構造物に適用する上での最大の課題は、言うまでもなく図一に示す構造物の性能指標、および性能低下過程をどのように設定するかになる。地盤構造物の性能低下要因は多様であることに加えて、その低下特性を把握するモニタリング手法も確立されていない。また、その構造



図二 構造物の性能低下曲線と維持補修の概念



図三 吹付けコンクリート斜面でのスライド破壊の発生状況

物の性能低下過程を、アセットマネジメントでの意思決定指標である LCC の算定に、どのように反映させるかについても統一した見解が得られていない。

このような制約条件がある中で、本総説では筆者らがこれまでにアセットマネジメントの概念を地盤構造物に適用した検討事例を紹介する。

ここで紹介する検討事例は、表一および表二に示すように、地盤構造物の代表例である斜面对策工、およびトンネルを対象としたものである。表一および表二には、各検討事例での以下の項目に対応する検討内容を示した。

- 性能低下評価項目
- 性能低下モデル化手法
- 将来予測モデル化
- 対応策（対策方針）
- LCC の内訳
- 最適化項目

以下に、表一および表二に示す内容の中で、特徴的な事項について解説を加える。

表一に示す斜面对策工事例 2 は、図三に示す切り取り斜面の表面を覆う吹付けコンクリートが背面地山の一部を含めてすべる破壊（スライド崩壊）に対する維持補修計画を立案したものである。このスライド崩壊は、吹付けコンクリート斜面背面地盤の風化により粘着力 c が低下することで発生するものと仮定している。具体的な粘着力 c の低下特性は、図四に示す吹付けコンクリート斜面背面地盤の風化に起因する弾性波速度の低下と関連付けるものとしてモデル化している。この事例の特徴は、図一に示した回帰曲線を外挿して推定するこ

表-2 斜面对策工を対象としたアセットマネジメントの適用事例

| 分類 | 斜面对策工事例 1 ⁶⁾ 地下水排除工の排水効果の低下 | 斜面对策工事例 2 ⁹⁾ 吹付コンクリート工のスライド破壊 | 斜面对策工事例 3 ¹⁰⁾ グラウンドアンカー工の損傷 |
|------------|---|--|---|
| 性能低下評価項目 | 水抜きボーリング工の閉塞率 | 背面地盤の風化に起因する粘着力 c の低下 | 目視点検結果に基づく健全度評価区分の変動 |
| 性能低下モデル化手法 | 連続型 回帰曲線の設定 | 連続型 幾何ブラウン過程でのトレンド μ およびボラティリティ σ の算定 | 離散型 マルコフ過程を用いた健全度評価区分の状態遷移行列 T の算定 |
| 将来予測モデル化 | 回帰曲線を用いた外挿 | 幾何ブラウン過程を用いた推定 (不確実性考慮) | 遷移確率行列を用いた外挿 |
| 対応策 | 水抜きボーリング工の洗浄 | 吹付コンクリート工打換え | グラウンドアンカー工の更新/延命化 |
| LCCの内訳 | ・補修費用 ・累積期待損失 | ・補修費用 ・累積期待損失 | ・点検費用 ・補修・更新費用 |
| 最適化項目 | 洗浄間隔 | 打換え時期/間隔 | 1) 対策工法選定 2) 点検間隔 |

表-3 トンネル工を対象としたアセットマネジメントの適用事例

| 分類 | トンネル工事例 1 ¹¹⁾ | トンネル工事例 2 ¹²⁾ |
|------------|---|---|
| 性能低下評価項目 | 点検項目の重み付けにより設定した性能指標の低下 注) 重み付け係数については、AHP ¹³⁾ 手法を用いて設定 | 点検項目の重み付けにより設定した性能指標の低下 |
| 性能低下モデル化手法 | 健全度区分毎に設定された余寿命を用いたシナリオ分析 | 連続型 幾何ブラウン過程でのトレンド μ およびボラティリティ σ の算定 |
| 将来予測モデル化 | 回帰曲線を用いた外挿 | 幾何ブラウン過程を用いた推定 (不確実性考慮) |
| 対応策 | ・防護ネット工 ・断面修復工 | 断面修復工 |
| LCCの内訳 | 補修費用 | 補修費用 |
| 最適化項目 | 対策工法選定 | 対策実施の優先付け |

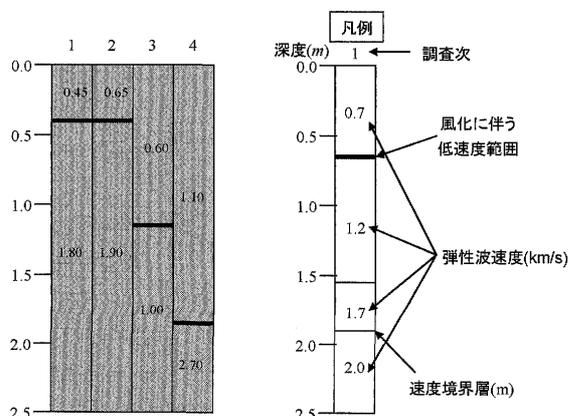


図-4 背面地山の水速検層結果の一事例

とに関する不確実性を、次式に示す幾何ブラウン運動過程¹⁴⁾を用いてモデル化していることである。

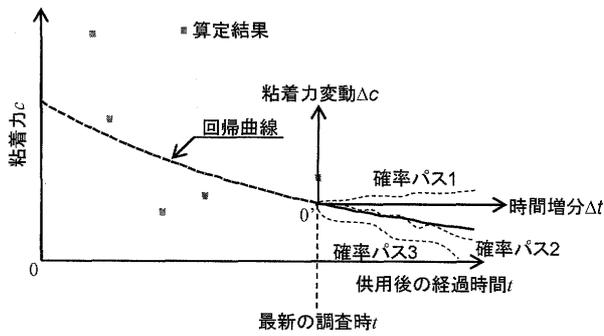
$$dc(t) = \mu c(t) dt + \sigma c(t) dW_1(t) \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $c(t)$ は時期 t における粘着力、トレンド μ は平均的変動率を表すパラメータ、ボラティリティ σ は平均的変動率回りの変動性を表すパラメータ、 $dW(t)$ は標準ウィーナー過程¹⁴⁾を表す。トレンド μ およびボラティリティ σ は、過去の変動データに基づき算定されるものである。

式(1)に示す幾何ブラウン運動過程は、現状では金融工学分野¹⁵⁾において、時間と共に変動する不確実性の高い株価等の金融商品の価格の将来予測のモデル化手法として用いられているものである。

なお、式(1)の幾何ブラウン運動過程は、一意的に解は得られない。このため、粘着力 c の変動は、図-5に示すように、標準ウィーナー過程は近似的に標準正規乱数を用いて離散化した確率パスとして算定する。そして、

総 説



図—5 粘着力の推定手法

LCCは、式(1)を離散した粘着力 c の確率パスを用いたモンテカルロシミュレーションにより、確率量として算定される。ただし、この事例で適用したモデル化においては、トレンド μ およびボラティリティ σ は、過去の変動データに基づき算定している。この過去のデータの蓄積が必要であることが、地盤構造物への適用を図る上での課題となる。

表—2に示す斜面对策工事例3は、表—2および表—3に示す事例の中で、唯一性能低下のモデル化として、表—4に示す目視点検結果の健全度区分という離散的な情報を用いたものである。本事例で対象とする表—4に示すアンカーの健全度評価区分に基づくマルコフ過程を用いた状態遷移のモデル化手法は、次式のように表される。

$$S(t+1) = S(t)[T]$$

$$S(t+\tau) = S(t)[T]^\tau \dots\dots\dots (2)$$

$$S(t) = [S_{\text{VI}}^{(t)}, S_{\text{V}}^{(t)}, S_{\text{IV}}^{(t)}, S_{\text{III}}^{(t)}, S_{\text{II}}^{(t)}, S_{\text{I}}^{(t)}] \dots (3)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} t_{66} & t_{65} & t_{64} & t_{63} & t_{62} & t_{61} \\ 0 & t_{55} & t_{54} & t_{53} & t_{52} & t_{51} \\ 0 & 0 & t_{44} & t_{43} & t_{42} & t_{41} \\ 0 & 0 & 0 & t_{33} & t_{32} & t_{31} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & t_{22} & t_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{11} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $S(t)$ は、供用後 t 年時点での点検したアンカー全体の状態を表す状態ベクトルを表し、その成分の $S_i^{(t)}$ は、供用後 t 年時点での各ランク i に相当するアンカー本数を表す。また、 $[T]$ は状態遷移行列を表す。なお、状態遷移行列 $[T]$ の成分 t_{ij} の算用数字 i および j (例えば3, 2)は、それぞれ健全度評価のランク分けを表すギリシャ数字(例えばIII, II)に対応することに留意されたい。

なお、マルコフ過程を用いた性能低下のモデル化では、遷移行列 $[T]$ の成分 t_{ij} は目視点検結果に基づく健全度評価区分の変動に基づき算定される。このため、その精度を保証するには、点検データが出来るだけ多く、かつ一定のサンプル数および一定の間隔で得られていることが前提条件となる。この制約が、地盤構造物の性能低下のモデル化に対してマルコフ過程を適用する上での課題となる。

次に、表—3に示すトンネル工での検討事例は、いずれも点検項目を重み付けすることで設定したトンネル覆

表—4 アンカーの健全度評価区分 (旧 JH 指針)¹⁶⁾

| 評価区分 | 状 況 |
|------|-----------------------------|
| I | 現状で全く機能していない |
| II | 機能が大幅に低下しており、今後区分Iになる可能性がある |
| III | 機能が低下しており、今後区分IIになる可能性がある |
| IV | 機能は多少低下しているが、対策によって機能を維持できる |
| V | 機能は良好で、対策により保持できる |
| VI | 現状のまま、良好な状態を維持できる |

工のはく落に対する性能指標を用いている。

この内、トンネル工事例1では、性能指標に含まれる各点検項目に対応する重み付けの係数は、AHP (Analytical Hierarchy Process) を用いて算定されている。さらに、算定された性能指標と、既存のトンネル覆工の健全度区分との相関から、その適用性についての検証を試みている。なお、この事例では、性能指標の将来的な低下予測は行わず、LCCの算定では健全度区分毎に設定された余寿命を用いたシナリオ分析を実施している。

一方、トンネル工事例2では、点検結果に基づき設定した性能指標の低下過程に対して、表—2に示す斜面对策工事例2と同様に、幾何ブラウン運動過程を用いて表現している。また、同モデルを用いた性能指標の予測値に対して、図—2に示すターゲットレベルをパラメータとし設定した断面修復工費用のシナリオに準じてLCCを算定している。この手法は、前述のように、図—1に示した外挿による推定精度の不確実性に対処できるものではあるが、過去の点検データの蓄積を必要とすることが課題となる。

4. 将来展望およびまとめ

本総説では、地盤工学分野における維持管理・補修に関する課題を示すとともに、斜面对策工およびトンネル工に対するアセットマネジメントの概念の適用事例について解説した。適用事例の紹介では、主として性能低下過程のモデル化手法について概説したが、そのモデル化手法には従来の地盤工学分野ではあまり扱われていないマルコフ過程あるいは幾何ブラウン運動等の確率過程が適用されていることを示した。ただし、これらは筆者らがこれまでに適用してきた検討手法を示したものであり、今後多様なモデル化手法の開発および適用が期待される。

また、当該分野においては、上記のモデル化手法の開発に加えて、今後モニタリング技術の開発が期待される場所である。前述のように、地盤構造物へアセットマネジメントの概念を適用する上では、点検データの蓄積を図るとともに、そのデータに基づく現状の構造物の性能規定および将来状態予測が最重要課題となる。現状で

は、地盤工学分野の点検データは目視点検に基づくものが主体であるが、今後は構造物の性能指標を定義するとともに、その性能低下過程を統一的に説明できるモニタリング技術の開発が期待される。この際には、2. のトンネル工事例1に示したように、各点検項目を統計処理し性能指標を定義するとともに、その指標を既存の等級として与えられる健全度区分との相関から、その適用性について検証する試みも重要であると推察される。また、従来より維持管理の取り組みで課題とされるように、高齢化社会での熟練点検員不足が確実に到来することから、モニタリング技術の開発は極めて重要な課題であると位置付けられる。

さらに、アセットマネジメントを導入する目的の一つは、1. で述べた硬直化した公共投資の予算構造の下では社会基盤構造物の維持管理は「事後補修」とならざるを得ない状況を打破し、「予防保全」による維持補修費用の平滑化を図るものである。例えば、江尻ら¹⁷⁾は舗装を対象として、平滑化した維持管理予算を合理的に予算会計に組み込む施策としてインフラストラクチャ会計という概念の重要性を唱えている。このためには、例えば道路構造物を対象とした場合には、従来からのミクロ的視点から個別構造物を検討対象とするのではなく、マクロ的視点から統計的手法を導入し路線単位での優先付けを実施して、その維持補修に関する予算の有効性について検証するという試み⁵⁾も重要であると考えられる。

以上に述べたように、地盤構造物へのアセットマネジメントの概念の導入を推進するためには、工学的知識のみならず、多様な学際的知識・手法を導入することが必要となる。そして、今後このような取り組みが活性化することが望まれる。

参 考 文 献

- 1) 地方財政白書平成20年版、総務省、2008.
- 2) 関口信康・大津宏康：道路斜面防災マネジメントの意思決定における情報提供手法に関する研究、建設マネジ

- メント研究論文集, Vol. 16, pp. 61~70, 2009.
- 3) 例えば、土木学会建設マネジメント委員会編：アセットマネジメント導入への挑戦、土木学会、2003.
- 4) Federal Highway Administration: Proc., Asset Management: Advancing the State of the Art into the 21st Century through Public-Private Dialogue, Washington, D. C, 1997.
- 5) 大津宏康：地盤構造物の診断・修復・更新（アセットマネジメント、地盤工学の今後の新たな展開）、地盤工学会誌, Vol. 58, No. 1, pp. 70~71, 2010.
- 6) 大津宏康・Supawiwat, N.・松山裕幸・高橋健二：地下水排除工の性能低下を考慮した斜面アセットマネジメントに関する研究、土木学会論文集, No. 784/VI-66, pp. 155~169, 2005.
- 7) 例えば、Mizutani, M.: A maintenance planning method (MPM) for deteriorating structures, Structural Safety and Reliability, Shiraiishi, Shinozuka & Wen (ed), Balkema, Rotterdam, pp. 443~450, 1998.
- 8) 例えば、Morcoux, G.: Performance prediction of bridge deck systems using Markov Chains, J. Perform. Constr. Facil., Vol. 20, No. 2, pp. 146~155, 2006.
- 9) 大津宏康・赤木 舞・松山裕幸・大谷芳輝：吹付けコンクリート斜面の維持補修費評価に関する研究、建設マネジメント研究論文集, Vol. 13, pp. 301~314, 2006.
- 10) 大津宏康・Suwanishwong THAMRONGSAK・幹 拓也・上出定幸：点検結果に基づくグラウンドアンカー工の維持補修計画、土木学会論文集 F, Vol. 66, No. 1, 158~169, 2010.
- 11) 中村一樹・竹内明男・大津宏康：トンネルの健全度評価手法におけるモデル化リスクに関する研究、建設マネジメント研究論文集, Vol. 12, pp. 101~108, 2005.
- 12) 安田 亨：リスク工学と地盤工学：7. アセットマネジメント、土と基礎, Vol. 52, No. 9, pp. 35~42, 2004.
- 13) 加藤 豊・小谷正典：ORの基礎 AHP から最適化まで、実教出版、1998.
- 14) 藁谷千鳳彦：ブラック・ショールズモデル、東洋経済社、2000.
- 15) Bodie, Z. and Merton, R. C. 著、大前恵一郎訳：現代ファイナンス論、ピアソン・エデュケーション、2001.
- 16) 高速道路調査会：斜面安定のためのアンカー工の計画・設計に関する研究（その3）報告書, p. 253, 1991.
- 17) 江尻 良・西口志浩・小林潔司：インフラストラクチャ会計の課題と展望、土木学会論文集, No. 770/VI-64, pp. 15~32, 2004.

(原稿受理 2011.5.16)