

岩盤力学分野へのアセットマネジメントの適用

大津 宏康¹

¹正会員 博士(工学) 京都大学国際融合創造センター 教授
(〒615-8520 京都西京区京都大学桂京都大学ローム記念館)
E-mail: ohtsu@iic.kyoto-u.ac.jp

少子高齢化社会の到来に伴う税収不足が想定される厳しい社会情勢の下で、インフラ構造物の建設・維持・補修・更新を含め、費用便益を総合的に評価する方法論として、アセットマネジメントという概念が注目されているが、同マネジメントに関する岩盤力学分野での取り組みは充分とはいえない。なお、現状ではインフラ構造物のアセットマネジメントに関して様々な定義がなされているが、世界銀行等でのアセットマネジメントの定義は、建設工事のフローの中で上流側に位置付けられる企画・調査・設計段階で、将来的な維持補修を踏まえて、最適なインフラ構造物の建設計画を立案するものである。このような観点から、本研究では上記の広義のアセットマネジメントの概念の岩盤力学分野への適用性について示す。

Key Words : *infrastructures, asset management, risk*

1. はじめに

少子高齢化社会の到来に伴う税収不足が想定される厳しい社会情勢の下で、昨今ではインフラ構造物の建設・維持・補修・更新を含めて、その費用・便益を総合的に評価する方法論として、インフラ構造物のアセットマネジメントという概念が注目されるようになってきた。

ただし、筆者ら¹⁾がこれまでに指摘してきたように、現状ではインフラ構造物のアセットマネジメントに関して様々な解釈がなされているようであり、その定義および対象とする適用範囲について、以下のような課題が顕在化しつつあるものと推察される。

- 1) インフラ構造物のアセットマネジメントについて、現状での建設分野が対象としているものの多くが、企画・調査・設計・施工・操業という一連の建設工事のフローの中で、操業段階すなわち既設構造物を対象とした検討に特化されたものである。これに対して、世界銀行WBを始めとする公的援助機関のアセットマネジメントの定義は、建設工事のフローの中で上流側に位置付けられる企画・調査・設計段階において、将来的な維持補修を踏まえて、最適なインフラ構造物の建設計画を立案するものである²⁾。
- 2) 1) の観点に加えて、維持補修に対する取り組みについても、予防保全の観点から、5年から10年程度の期間を対象として、点検結果を更新しながら、緊急補修・事後補修が突発的な予算執行となるのに対して、

年度毎での平滑な補修予算を立案するものである。このため、一義的に補修を実施すると言うのではなく、どの箇所から補修を行うか否かの意思決定において、安定性および補修による投資対効果を総合的に判断することが必要となり、図-1に示すように不確実性要因を含むことになる。

なお、インフラ構造物のアセットマネジメントにおける意思決定を行う指標としては、ライフサイクルコストLCC（以下LCCと称する）を適用することについては、現状では合意が得られているようである。ただし、1) および2) の課題に示したように、インフラ構造物のアセットマネジメントに関する定義が異なるため、LCCの定義、および長期的な構造物の供用における不確定事象のモデル化において、統一的な見解が得られていないのが現状である。特に、長期的な構造物の供用における不確定事象のモデル化に関しては、後述するように、LCCに不確定事象に対するリスクコストを付加するという手法が一般的になりつつあるが、そのモデル化において統一的な見解が得られていない。すなわち、構造物の性能低下のモデル化あるいは、地震・降雨等の自然ハザードのモデル化について、様々な取り組みが報告されている。さらに、リスクコストの算定の基本となる、将来的な構造物の性能低下による便益低下すなわち、損失の評価においても様々な取り組みが報告されている。

このような観点から、本研究では、インフラ構造物のアセットマネジメントについて世界銀行WBを始めとす

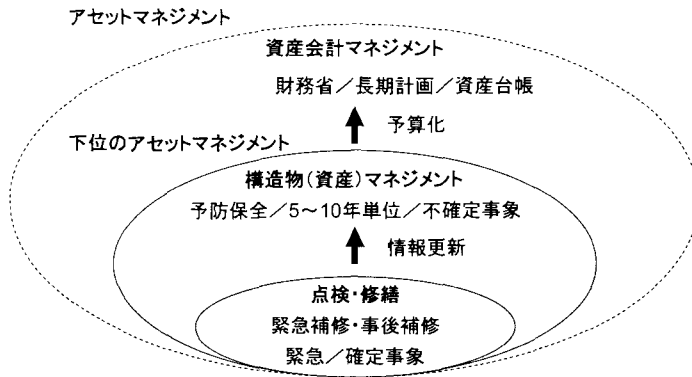


図-1 インフラ構造物アセットマネジメントの基本概念

る公的援助機関の定義について概説すると共に、LCC評価での、現在提案されている構造物の性能低下による便益低下すなわちリスクコストのモデル化手法について整理して解説する。

2. LCCの基本モデル

前述のように、世界銀行WBを始めとする公的援助機関のアセットマネジメントの定義は、建設工事のフローの中で上流側に位置付けられる企画・調査・設計段階において、将来的な維持補修を踏まえて、最適なインフラ構造物の建設計画を立案するものである。この定義に基づけば、インフラ構造物のLCCは、次式のように表現されるであろう。

$$LCC = C_C + C_{MT} + C_O \quad (1)$$

ここに、 C_C は建設コスト、 C_{MT} は維持補修費用（点検および更新費用を含む）、 C_O はオペレーション費用を表す。なお、式(1)に含まれるオペレーション費用 C_O の代表例としては、PFIプロジェクトにおけるプロジェクトへの融資に対する返済額が挙げられる。

ここで、式(1)に示すLCCには、多くの不確実性要因を含むことは言うまでもない。この数多くの不確実性要因が、建設工事のフローの中で顕在化する可能性については、模式的には図-2に示すように表わされるであろう³⁾。

なお、同図においては、不確実性要因により変動する可能性がある費用・便益（図-2においては収益と表示）の項目については、波線を用いて表示している。また、同図では、維持補修費用 C_{MT} とオペレーション費用 C_O を併せて、OM費用として表示していることに留意されたい。

したがって、図-2に示す収益に関する不確実性を考慮

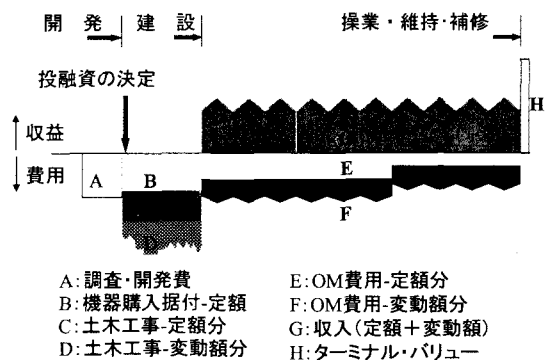


図-2 建設プロジェクトにおける費用・収益の分類³⁾

すれば、式(1)に示すインフラ構造物のLCCの評価式は、次式のように書き換えられるであろう。

$$LCC = C_C + C_{MT} + C_O + \Delta R \quad (2)$$

$$\Delta R = \Delta R_C + \Delta R_{MT} + \Delta R_O \quad (3)$$

ここに、 ΔR はLCC評価における総リスクコストを表す。また、 ΔR_C 、 ΔR_{MT} 、 ΔR_O は、それぞれ建設コスト、維持補修費用およびオペレーション費用に関するリスクコストを表す。

現状でのインフラ構造物のアセットマネジメントに関する研究分野では、式(3)に示す各リスクコスト項目の内、主として維持補修費用に関するリスクコスト ΔR_{MT} のみが検討対象とされており、建設コストのリスクコスト ΔR_C およびオペレーション費用のリスクコスト ΔR_O については、ほとんど取り扱われていない。これは、前述のように、現状での建設分野が対象としているアセットマネジメントに関する研究の多くが、企画・調査・設

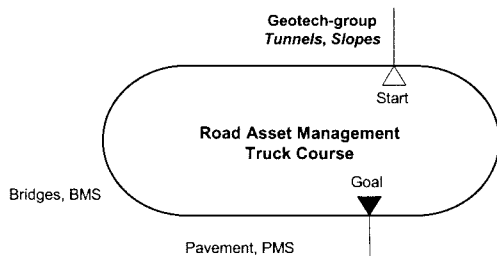


図-3 道路構造物アセットマネジメントの現状

計・施工・操業という一連の建設工事のフローの中で、操業段階すなわち既設構造物を対象とした検討に特化されていることに起因する。これに加えて、建設コストのリスクコスト ΔR_C について数学的に取り扱った事例は極めて少ない。その数少ない事例としては、筆者ら^{3), 4)}が建設コスト変動要因の内、地盤のリスク要因に起因するコスト変動リスクを評価した研究が挙げられる。また、オペレーション費用に関するリスクコスト ΔR_O についても、同様に土木分野では全く研究の対象とされてこなかったと言えよう。当該分野の研究としては、尾ノ井ら⁵⁾による、PFIによるプロジェクトでのオペレーション費用に関するリスク要因として金利変動を考慮し、金融工学理論に基づき、その費用変動を評価した研究事例が挙げられる程度である。

このような観点から、今後インフラ構造物のアセットマネジメント分野の研究においては、建設コストのリスクコスト ΔR_C およびオペレーション費用のリスクコスト ΔR_O の定量的評価に関する必要性が高まるものと推察される。しかし、本研究においては、上記の2項目のリスクコスト算定の必要性を述べるに留め、以下に現在提案されている構造物の性能低下による便益低下すなわち維持補修費用のリスクコスト C_{MT} のモデル化手法について整理して解説する。

3. 維持補修を対象としたアセットマネジメントの適用状況

筆者ら¹⁾が、これまでに示してきたように、道路構造物を対象とした場合には、図-3の模式図に示すように維持補修を対象としたアセットマネジメントの概念の適用は、舗装・橋梁が先行し、本研究で対象とする岩盤構造物については、未だ途についたばかりであると位置付けられるであろう。そして、昨今岩盤構造物についてのアセットマネジメントの概念の重要性が認識されつつあるが、これに伴い新たな認識の差が生まれつつある。

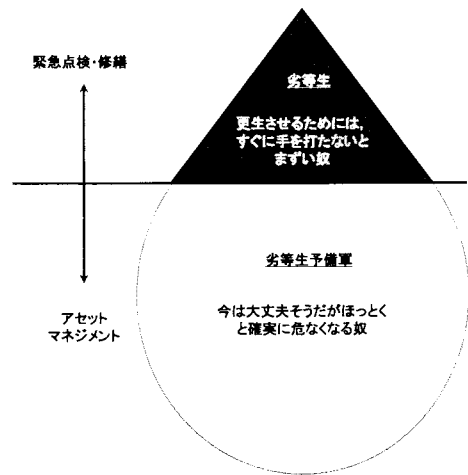


図-4 劣等生と劣等生子備軍

すなわち、従来岩盤構造物のいわゆる維持管理マネジメントについては、点検・補修という観点からの検討がなされてきた。このため、今後導入される岩盤構造物のアセットマネジメントと、点検・補修とは明確に区別することが必要となる。このため、本研究では、図-4に示すように、例示的に岩盤構造物のアセットマネジメントと、点検・補修の違いについて解説を試みる。

まず、斜面の維持補修問題について、点検結果に基づき検討対象とする不安定斜面を、図-4に示すように、以下の2種類に区分することを試みる。

1) 劣等生

更生させるためには、すぐに対策が必要である。つまり、不安定斜面の内、緊急に対策を必要とするものが相当する。

2) 劣等生子備軍

現状では大丈夫そうだが、将来確実に対策が必要である。すなわち、不安定斜面の内、将来的に対策を行う必要があると判断されるものが相当する。

このような分類の下で、劣等生と劣等生子備軍に対する予算的な措置は、図-5に示すように区別されるのである。すなわち、図-5に示すように劣等生に対しては早急な対応が求められるために、突発的な出費が生じることになる。これに対して、劣等生子備軍については、緊急には対応する必要がないため、図-5に示すように維持補修予算の平滑化が可能となることになる。

これらの例を用いて説明を試みたことは、すなわち道路斜面におけるアセットマネジメントとは、緊急の対策を必要とする斜面をすべて補修した後に、適用されるものであることを示すためである。したがって、これらの事項を踏まえて、斜面の維持補修における不安定斜面の取り扱い、表-1に示すように要約されるであろう。

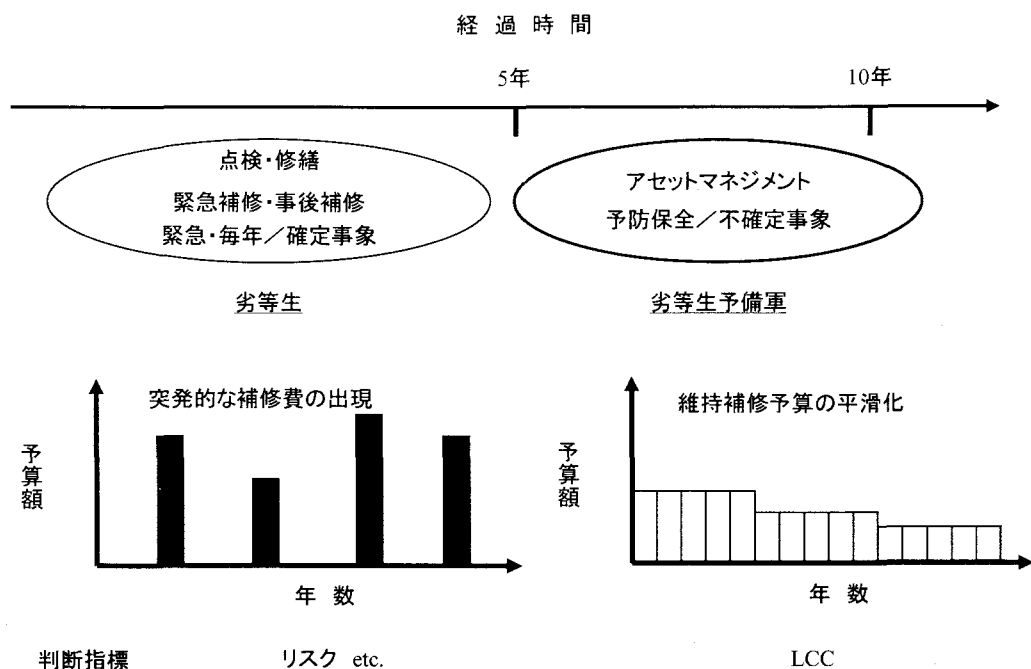


図-5 点検・修繕とアセットマネジメントの比較

表-1 不安定性斜面の取り扱い

分類	内容	優先付け判断指標
劣等生	更生させるためには、すぐに対策が必要	年間損失期待値（年間リスク） R_a
劣等生予備軍	現状では大丈夫そうだが、将来確実に対策が必要	期待ライフサイクルコスト LCC

同表に示すように、例示的に不安定性斜面を分類できれば、対策の優勢順位付けの指標としては、劣等生および劣等生予備軍に対して、それぞれ年間損失期待値（年間リスク） R_a および期待ライフサイクルコストLCCを適用することが必要となる。

したがって、構造物に損傷モード j の破損が生じる条件付確率 $\Phi_j(\alpha)$ は、以下のように定義される。

$$\Phi_j(\alpha) = p_j(\alpha) - p_{j+1}(\alpha) \quad (1 \leq j < J) \quad (4)$$

$$\Phi_J(x, \alpha) = P_J(x, \alpha) \quad (5)$$

4. 斜面の期待ライフサイクルコストの評価方法

(1) リスク評価モデル

多様な崩壊パターンが想定される問題に対するリスク評価モデルについて示す。ここでは、設計パラメータを不確定量とし、損傷モード j も J 通り存在するものとする。また、各損傷モードに対する損失も L_i ($i=1, J$) とする。次に、ハザードレベル α の条件の下で、損傷モード j 以上の損傷が生じる条件付確率を $p_j(\alpha)$ とする。なお、この条件付確率 $p_j(\alpha)$ は、構造物の性能低下を考慮した場合には、経過時間毎に異なる値となることに留意されたい。

また、式(4)および式(5)より、条件付損失期待値 $R(\alpha)$ は、その損傷モード j に対する損失を L_j とすると、以下のよう表される。

$$R(\alpha) = \sum_{j=1}^J L_j \cdot \Phi_j(\alpha) \quad (6)$$

次に、自然ハザード曲線で1年間にハザードレベル α 以上のハザードが発生する確率 $\Psi(\alpha)$ は、ハザードの発生確率密度 $\varphi(\alpha)$ と次式のように関連付けられる。

$$1 - \Psi(\alpha) = \int_0^{\alpha} \varphi(X) dX \quad (7)$$

ここで、ハザードレベル α の発生する確率が $\varphi(\alpha)d\alpha$ であることに注意すれば、年間損失期待値 R_a は以下のように算定される。

$$R_a = \int_0^{\infty} R(\alpha) \varphi(\alpha) d\alpha = - \int_0^{\infty} R(\alpha) \frac{\partial \Psi(\alpha)}{\partial \alpha} d\alpha \quad (8)$$

次に、構造物の性能低下を考慮した場合には、経過時間毎に異なる値となる。このことから、経過年数 i に対する年間損失期待値を R_{ai} と標記すると、自然ハザードを考慮した場合の維持補修費用に関するリスクコスト ΔR_{MT} は、次式のように表わされる。

$$\Delta R_{MT} = \sum_{i=1}^J R_{ai} L_i \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1} \quad (9)$$

以上の定式化において示したように、式(3)に示すLCCに含まれる維持補修費用のリスクコスト ΔR_{MT} の評価手法については、大別して性能低下を時間空間で連続量として表現する方法と、離散量として表現する方法に区分される。そして、離散量として表現する方法においても、地震・降雨等の自然ハザードの影響を評価するか否かに区分することが出来る。

このように、LCCに含まれる維持補修費用のリスクコスト ΔR_{MT} の評価において、現状では統一的な取り扱いがなされていないことに留意すべきである。

(2) 損失評価モデル

維持補修費用のリスクコスト C_{MT} の評価については、式(6)に示すように、生起確率と損失の積となる期待損失値として評価することが一般的である。

ただし、その生起確率の評価方法が異なることに加えて、損失の評価方法についても、様々な解釈がなされているのが現状である。

言うまでもなく、構造物の破壊に伴う損失は、すべての要因を定量化することは出来ないため、一般的にその評価が困難である。さらに、その損失を評価する上で、損失 L_i についてどの立場（主体）からの損失とするかによって、その評価が異なることになる。

このような観点から、本章ではインフラストラクチャーの代表例として高速道路を想定した場合の損失の評価の基本的な考え方について概説する。

ここで、高速道路に関連する構造物が破損した後も復旧して使用するものとすれば、高速道路が破損することによる事業者および用者の損失は、それぞれ以下のよう

① 事業者損失 L_o

- ・ 復旧費
- ・ 道路閉鎖期間の営業損失
- ・ 人的・物的補償費

② 利用者損失 L_u

- ・ 道路閉鎖期間の営業機会損失
- ・ 道路閉鎖期間の迂回・走行時間損失

すなわち、事業者損失 L_o は、復旧費、道路閉鎖期間の営業損失、人的・物的補償費の和として表現される。一方、利用者損失 L_u は、道路閉鎖期間の営業機会損失および迂回・走行時間損失の和として表現される。なお、このような損失の分類は、それぞれ事業者の立場からの損失、および利用者損の立場からの損失を明示するものである。

ここで、既往の研究を概観すると、①の事業者損失 L_o のみを考慮した事例が比較的多いと言える。また、ここで議論する道路構造物とは異なる、主として民間構造物である建屋・施設等を対象とした場合、ほとんどが①の事業者あるいは所有者の損失のみを考慮している。

これに対して、インフラ構造物に加えて、鉄道構造物・ライフライン構造物のような公的性質が強い構造物については、②の利用者損失 L_u を考慮した研究事例が増加しつつある。なお、このような利用者損失 L_u の評価は、言うまでもなく費用便益解析で規定される便益が、構造物の破壊を含む性能低下による便益の減少を、リスクコストにおける損失と捉えるものである。

道路構造物を想定した場合に、利用者損失 L_u を評価するためには、迂回に伴って生じる走行時間および走行費用の増加についても、金銭的価値で評価する。このような考え方は、道路計画や事業実施の妥当性を判断するための手法として中村ら⁶⁾や太田⁷⁾の研究においてまとめられている。それらの研究に基づく利用者損失 L_u の評価事例については、資料1) および資料8) を参照されたい。ここで、ハザードレベル α および損傷レベル j に対する損失 $L_j(\alpha)$ を、次式のように表わされるものとする。

$$L_j(\alpha) = L_o^j(\alpha) + L_u^j(\alpha) \quad (10)$$

この仮定の下では、損失 $L(\alpha)$ は高速道路構造物の性能を当初の便益に回復させるまでに必要な損失と定義できる。また、事業者のみならず利用者の損失を考慮することで、式(10)に示す損失は社会全体としての損失を表

すものとなる。なお、式(10)に示す社会全体としての損失を評価する上で留意すべきことは、この評価モデルにおいては、事業者損失 L_o に含まれる道路閉鎖期間の営業損失を考慮しないことである。確かに、道路閉鎖をすることでその期間に事業者は収入が減少するが、その間道路利用者は通行料金を支払わないことになるため、道路利用者の出費は減少することになる。したがって、このようなモデル化では、道路閉鎖期間の営業損失は、事業者と利用者の間で相殺されることになると解釈し、式(10)に示す社会全体としての損失では、道路閉鎖期間の営業損失を含めないものとする。

次に、式(10)に示す損失評価モデルにおいて、利用者損失 L_u を考慮する意味について示す。筆者ら¹⁾は、これまでに研究において、実際の一般道路を対象として事業者損失 L_o （道路閉鎖期間の営業損失を除く）と利用者損失 L_u の比較を試みてきた。この結果として、式(10)に示す損失評価式の内訳で利用者損失 L_u が支配的になることを示してきた。したがって、インフラ構造物に加えて、鉄道構造物・ライフライン構造物のような公的性質が強い構造物については、式(10)に示すように、事業者のみならず利用者の損失を考慮し社会全体としての損失を考慮することが必要となる。ただし、この場合には、前述のように、事業者の営業収入の損失は、利用者の支出減と相殺されるため、社会的損失には加えないことに留意することが必要である。

5. まとめ

本研究において示した内容は以下のように要約される。

- 1) 世界銀行WBを始めとする公的援助機関のアセットマネジメントの定義は、建設工事のフローの中で上流側に位置付けられる企画・調査・設計段階において、将来的な維持補修を踏まえて、最適なインフラ構造物の建設計画を立案するものである。

2) 1)に示したアセットマネジメントの定義に基づけば、その判断指標なるLCCの評価において含まれる多くの不確実性要因を考慮するために、建設コスト、維持補修費用およびオペレーション費用に関するリスクコストを評価することが必要となる。

3) LCCに含まれる維持補修費用のリスクコスト C_{MT} の評価での損失評価において、インフラ構造物に加えて、鉄道構造物・ライフライン構造物のような公的性質が強い構造物については、事業者のみならず利用者の損失を考慮し社会全体としての損失を考慮することが必要となる。

参考文献

- 1) 大津宏康, Nutthapon Supawiwat, 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.
- 2) 大津宏康, 中澤慶一郎, 安田亨: ベトナムにおける道路アセットマネジメント調査結果, 土木学会論文集 (投稿中), 2005.
- 3) 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 大西有三, 足立純: PFI プロジェクトの地盤に起因する建設コスト変動評価に関する研究, 土木学会論文集, No.777/VI-65, pp. 175-186, 2004.
- 4) 大津宏康, 尾ノ井芳樹, 大西有三, 高橋徹, 坪倉辰雄: 力学的地盤リスク要因による建設コスト変動の評価に関する研究, 土木学会論文集, No.756/VI-62, pp. 117-129, 2004.
- 5) 尾ノ井芳樹, 大津宏康: 地盤リスクを有する民間プロジェクト投資評価に関する一考察, 建設マネジメント研究論文集, Vol.11, pp. 409-416, 2004.
- 6) 中村英夫他: 道路投資の評価に関する指針(案), 道路投資の評価に関する研究委員会, 日本総合研究所, pp.51-57, 1998.
- 7) 太田勝敏: 道路投資の社会経済評価, 道路投資評価研究会, 東洋経済新報社, pp.110-121, 1997.
- 8) 大津宏康, 大西有三, 水谷守, 伊藤正純: 地震に伴う災害リスク評価に基づく斜面補強の戦略的立案方法に関する一提案, 土木学会論文集, No.679/VI-51, pp. 123-134, 2001.

APPLICABILITY OF ASSET MANAGEMENT TO ROCK STRUCTURES

Hiroyasu OHTSU

In this paper, basic methodology to apply concept of asset management to rock infrastructures is discussed. In detail, this paper presents the basic concept to evaluate risk cost involved in life cycle cost, LCC and relative mathematical background. In addition, focusing on rock slopes adjacent roads as representatives of rock infrastructures, methodology to evaluate expected life cycle cost, ELCC, considering performance deterioration of rock structures are presented. Furthermore, concept to evaluate losses involved in ELCC, which are caused by slope failure, are presented.