

岩盤構造物の創造・保生マネジメント に関する研究概要とその展望

大津 宏康^{1*}

¹ 京都大学大学院 経営管理研究部 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

*E-mail: ohtsu@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

Key Words : *project management, risk management, cost-benefit, life cycle cost*

1. はじめに

岩盤力学は、日本の高度経済成長期においてエネルギー供給および交通ネットワーク整備という国民の生活を向上・安定させる社会基盤整備において多大な貢献をしてきた。そして、現在その整備水準がほぼ当初の目的を達したことに加えて、今後確実に少子高齢社会が到来することから、従来の「足らざるものを建設する」から、「質の高い社会基盤構造物を合理的に創造・保生する」へとパラダイムシフトを図ることが緊急の課題となっている。

このような社会基盤構造物を合理的に創造・保生するという建設マーケットの課題に対処するためには、岩盤力学に関わる技術者は、従来型の力学に関する要素技術に加えて、いわゆる社会経済学等の学際的知識に基づくマネジメント技術を備えることが必要となる。しかし、我が国の建設分野は要素技術としては世界でトップクラスにあるにもかかわらず、上述のマネジメント技術の欠如により、国際競争力に乏しいことが指摘されている。

このような観点から、岩盤構造物の創造・保生に関するマネジメント研究小委員会（以下本研究委員会と称す）では、今後岩盤力学に関わる技術者が具備すべき技術として、以下の2つの事項に関する研究を実施してきた。

- 1) 地下岩盤工事における建設コスト変動リスク評価に関する研究
- 2) 岩盤構造物の合理的な維持補修に関する研究

言うまでもなく、前者は「質の高い社会基盤構造物を合理的に創造する」ことに、一方後者は「質の高い社会基盤構造物を合理的に保生する」ことに関わるものである。

本研究活動の波及効果としては、岩盤力学に関わる技

術者にエンジニアリングエコノミー感覚の啓蒙と、新たな岩盤力学に関わる建設マーケットの創造・拡大等が期待される。

本報告では、現在本研究委員会において取組んでいる研究内容の概要およびその展望について、以下に紹介するものとする。

2. ライフサイクルモデルの基本概念

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（以下アセットマネジメントと称す）という概念が注目されるようになってきた¹⁾。

ここで、インフラ構造物のアセットマネジメントについては、その定義および対象とする適用範囲について様々な解釈がなされている。例えば、世界銀行（World Bank）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⁾。この定義に基づけば、インフラ構造物のライフサイクルコスト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わす。なお、式(1)に含まれるオペレーション費用

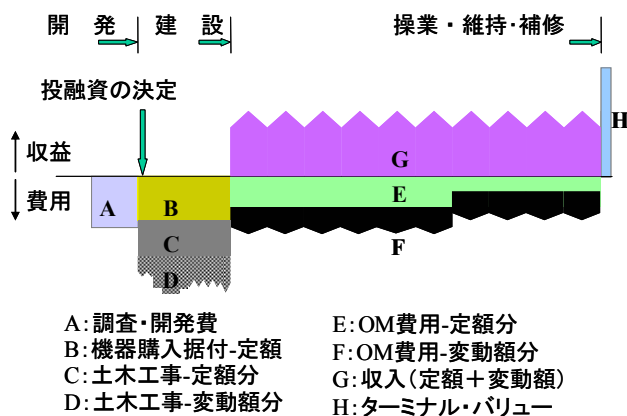


図-1 建設プロジェクトにおける費用・収益の分類³⁾

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-1に示すように表わされる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-1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-1に示す費用に関する不確実性を考慮すれば、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わす。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わす。

なお、式(3)に示すリスクコスト項目の内、オペレーション費用に関するリスクコスト ΔR_O については、土木分野ではこれまでに全く研究の対象とされてこなかったと言える。当該分野の研究としては、尾ノ井ら⁴⁾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⁵⁾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。この分野の研究は、今後PFIプロジェクト等を対象として、式(2)に示す詳細なLCCを算定する上では重要な検討課題となるものと推察される。ただし、

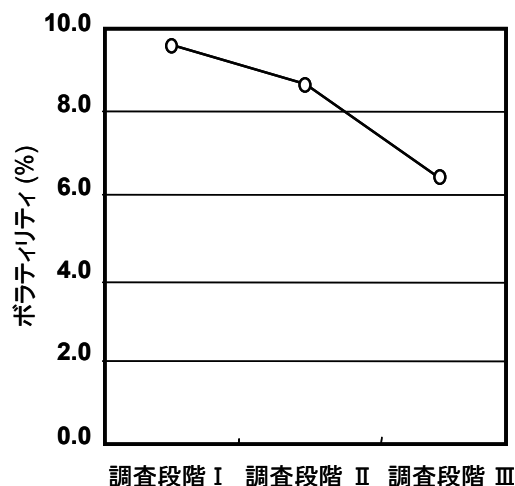


図-2 建設コストのボラティリティ

本研究委員会では、オペレーション費用に関するリスクコスト ΔR_O については取り扱っておらず、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 の定量的評価を研究対象としている。

3. 岩盤構造物の建設コスト変動リスク評価に関する研究

現状でのLCC評価を含む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。

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^{7), 8)}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。例えば、図-2は図-3に示すタイにおいて建設された揚水式地下発電所での地下空洞の建設コストに関して、文献⁹⁾に示した、地盤統計学を用いたリスク評価手法を用いたコスト推定結果として、調査の進行に伴い推定される建設コストに含まれる不確実性（同図ではボラティリティと標記）が低減される傾向を定量的に示したものである。なお、図-2におけるボラティリティとは、推定される建設コストのリスクと期待値の比の百分率を表わ

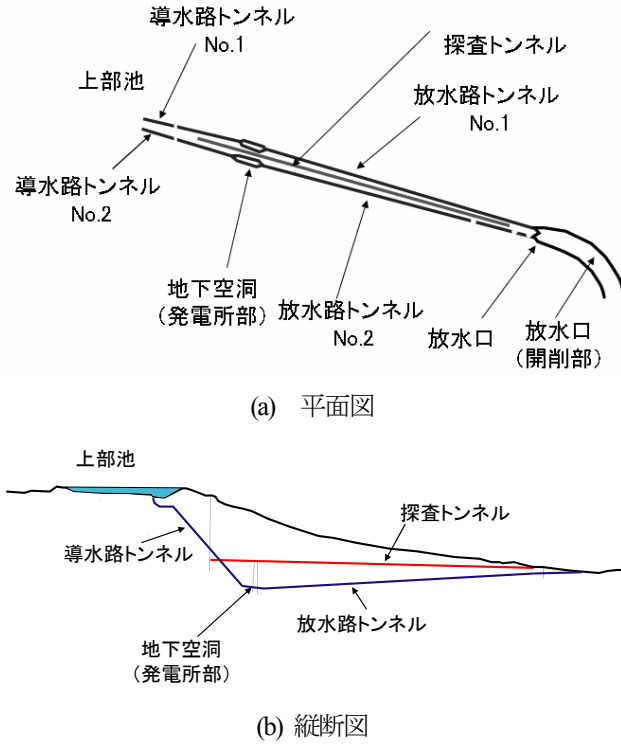


図-3 揚水式発電所レイアウト^{7,8)}

すものである。したがって、同図に示すように、地質調査量が増えるに従って推定される建設コストのリスクが低減される傾向が示されている。このような研究は、今後地盤構造物を対象とし、地質調査の価値を定量的に示すものであることから、より一般的になることが期待されるものと推察される。

4. 岩盤構造物の合理的な維持補修に関する研究

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、これまでに数多くの研究事例が報告されているが、まず構造物の性能低下のモデル化については、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であろう。また、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。

筆者ら⁹⁾がこれまでに提案してきた地盤・岩盤構造物の期待LCCの評価式は、対策工の更新費用と累積期待損失の和からなるものと仮定したものである。すなわち、斜面の対策工を何年目かに更新し、構造物を N 年間供用する場合の期待ライフサイクルコスト LCC_N は、以下のように算定されるものとする。

$$LCC_N = \sum_{i=1}^N p_{ai}^* C \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1} + \sum_{i=1}^N I(i+1) \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^i \quad (4)$$

$$p_{ai}^* = - \int_0^{\infty} p_i(\alpha) \frac{\partial \Psi(\alpha)}{\partial \alpha} d\alpha \quad (5)$$

ここに、 p_{ai}^* は供用年 i 時点での構造物の年間破壊確率、 C は斜面崩壊に伴う直接損失と社会的な損失を考慮した間接損失の和、 ρ は社会的割引率、 $I(i)$ は対策工の補修・更新に要する費用を表わす。なお、 $I(i)$ は具体的には、添字 i は更新がなされる年数の場合のみ補修費を表わし、その他の場合には0である。また、 $p_i(\alpha)$ は供用年 i 時点でのハザードレベル α に対する構造物の条件付破壊確率、 $\Psi(\alpha)$ はモデル化したハザード情報（ハザードレベル α とそのハザードレベル強度 α の事象が発生する年超過確率の関係）を表わす。

なお、式(4)に示す供用年 i 時点での構造物の年間破壊確率の算定手順の詳細については、文献9)を参照されたい。

また、式(4)に含まれる社会的割引率 ρ は、将来に想定される収入・支出を現在価値に割り戻して評価するために用いられる係数である。このため、構造物の重要度とは無関係に、対象国のマクロ経済の成長率あるいは公定歩合等に連動して設定されるものであり、現状では具体的な値として、日本では0.04に設定されることが一般的である¹⁰⁾。

ここで、式(4)に示す供用年 i 時点での構造物の年間破壊確率 p_{ai}^* と更新費用 $I(i)$ の関係について以下に解説する。すなわち、対策工を m 年目および、その $m+n$ 年目に更新し斜面を無限に供用するものとすれば、その構造物の年間破壊確率 p_{ai}^* の推移は、以下の数列として表わされる。

$$p_{a1}, p_{a2}, \dots, p_{am}, p_{a1}^{(1)}, p_{a2}^{(1)}, \dots, p_{an}^{(1)}, p_{a1}^{(2)}, p_{a2}^{(2)}, \dots \quad (6)$$

ここに、 $p_{ai}^{(j)}$ は、 J 回目の更新後の i 年目の状態での斜面の年間破壊確率を表わす。

また、式(4)に対応する更新費用 $I(i)$ の推移は、例えば m 年目に更新するとすれば、以下のような数列として表わされる。

$$0, 0, \dots, 0, I_m, 0, \dots, 0, I_n, 0, \dots \quad (7)$$

ここに、 I_n は1回の対策工の更新に要する費用を表わす。以上のモデル化手法に基づく解析事例として、図4に

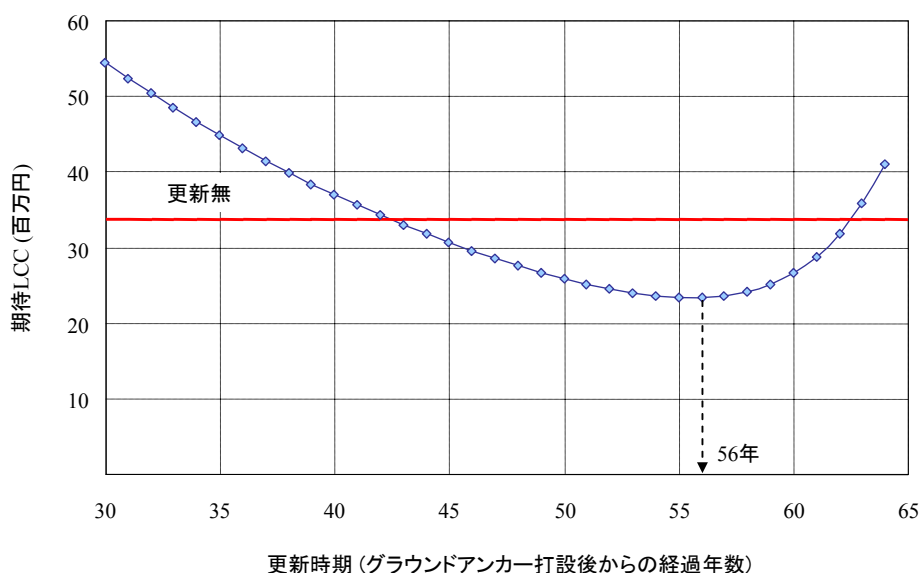


図-4 更新時期をパラメータとした期待LCCの比較（供用後64年時点）

示す岩盤斜面でのグラウンドアンカーの最適更新時期の検討結果を示す。この事例では、グラウンドアンカーの腐食に伴う性能低下過程を考慮し、図-4に示すようにLCCを判断基準としてグラウンドアンカーの最適更新時期を算定したものである。なお、本事例の解析条件等については文献¹¹⁾を参照されたい。

図-4に示すように、更新時期をパラメータとした斜面の期待LCCの比較において、更新時期が42年以下および63年以上でグラウンドアンカーを更新した場合には、比較のために示した全くグラウンドアンカーを更新しない場合の期待LCCよりも大きくなっている。この理由は、更新時期が42年以下の場合には、供用後の経過時間が50年以下での年間破壊確率自体が微小であるため、期待LCCの評価結果では、グラウンドアンカーの更新費用が支配的になる。一方、更新時期が63年以上の場合には、年間破壊確率の増加に伴い、式(4)における累積期待損失が増大することになる。そして、結果的には当該斜面ではグラウンドアンカーを供用後56年目に更新することが最適であるという結果が得られる。

5. まとめ

本報告では、本研究委員会の研究内容として、従来の岩盤力学に社会経済的な観点を加えたマネジメント技術について事例を用いて紹介した。このような活動の発展が、岩盤力学に関わる技術者にエンジニアリングエコノミー感覚の啓蒙と、新たな岩盤力学に関わる建設マーケットの創造・拡大等につながれば、本研究委員会メンバ

ーの幸いとする所である。

参考文献

- 1) 大津宏康：建設分野におけるリスク工学の適用性とその展望，土木学会論文集 No.728/VI-58，pp.1-16，2003.
- 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，No. 812/ VI -70，pp.85-93，2006.
- 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) 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.
- 5) 野口悠紀夫：金融工学、こんなに面白い，文春新書，pp. 42-109，2000.
- 6) Milgrom, P. and Roberts, J.：奥野正寛他訳：組織の経済学，NTT出版，1997.
- 7) 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.
- 8) 大津宏康，尾ノ井芳樹，境亮祐：地盤統計学に基づく地下工事における地質調査の価値評価に関する一提案，建設マネジメント研究論文集，Vol.12，pp.9-18，2005.
- 9) 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.
- 10) 道路投資の評価に関する研究委員会編：道路投資の評価に関する指針(案)，日本総合研究所，1998.
- 11) 大津 宏康，松山 裕幸，SUPAWIWAT Nutthapon，高橋 健二：斜面対策工の性能低下過程の不確実性を考慮した LCC 評価，土木学会論文集 F，Vol. 62，No. 2，pp.405-418，2006.