

地盤構造物を対象としたアセットマネジメントに関する一提案

大津宏康¹・Nutthapon Supawiwat²・高橋健二³

¹正会員 博士(工) 京都大学国際融合創造センター 教授(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²学生員 M. Sc. 京都大学大学院 工学研究科博士後期課程学生(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 博士(工) 水文技術コンサルタント株式会社(〒261-0004 千葉市美浜区高洲1-24-2)

昨今、成熟型社会における構造物の維持・補修・更新の最適化という課題に対処するため、従来の技術論に基づく検討に加えて戦略的に維持補修予算投資を決定するというアセットマネジメントという観点からの検討が注目を集めつつある。ただし、現状では本研究で取り扱う斜面のような地盤構造物に対するアセットマネジメントに関する概念は、未だ確立されていない。このような観点から、本研究では道路斜面を対象として、限定した議論ではあるが、降雨に代表される自然ハザードの到来に対する災害リスク評価を基本としたライフサイクルコストの評価方法の基本概念について示す。さらに、国道に隣接する斜面を対象としたライフサイクルコスト評価結果を示し、本研究に示す手法の適用性について述べる。

キーワード:アセットマネジメント, リスク, 斜面, ライフサイクルコスト

1. はじめに

昨今、土木構造物の維持補修問題に対して、従来の技術論に基づく検討に加えて戦略的に維持補修予算投資を決定するというアセットマネジメントという観点からの検討が注目を集めつつある。ただし、現状でのアセットマネジメントの概念が提要されつつある分野は、舗装・橋梁の維持補修に限定されており、本研究で取り扱う斜面のような地盤構造物に対する研究は、いまだ途についたばかりである。

この理由は、従来の維持補修問題の主たる着眼点は、橋梁に代表される鋼部材あるいはコンクリート部材の劣化過程をどのように点検により見つけ出すかということに限定されていたため、明確な劣化過程を示さない地盤構造物は検討対象として取り扱われて来なかったものと推察される。

ここで、土木構造物のアセットマネジメントに関する基本的な検討事項は、以下のように要約されるであろう。

構造物の現在状態規定

構造物の劣化および、自然ハザード(地震・降雨等)の到来に対する将来状態予測

および に基づく費用対効果を考慮した最適な維持補修計画の立案

この内、の構造物の現在状態規定に関しては、地盤構造物を始めとするいずれの土木構造物については、い

わゆる現地での定期的な点検が実施されており、事業者毎に規定された点検フォーマットに従い定義されることが一般的である。

次に、の将来状態予測に関しては、前述のように舗装・橋梁の問題では、マルコフ過程に代表される確率過程を用いて材料の劣化あるいは構造物としての性能低下を表現するモデルが提案されている^{1),2)}。これに対して、本研究で対象とする地盤構造物では、前述のように風化現象のような数百年単位での長期の力学特性変化を除いて、通常の構造物の供用期間での材料としての劣化過程を示さないことから、舗装・橋梁のような確率過程を用いたモデル化手法は提案されていない。

この将来状態予測に関する取組みの相違が、の費用対効果を考慮した最適な維持補修計画に関する意思決定問題への取組みの相違に繋がる。すなわち、舗装・橋梁問題における確率過程を用いたモデル化手法では、維持補修計画の最適化は、将来状態予測に基づきライフサイクルコスト LCC を判断指標とするものである。なお、この材料あるいは構造物の将来状態予測については、多くの不確実性要因を含んでいるため、近年ではその不確実性要因を考慮するためリスク工学の概念を援用した研究も報告されつつある³⁾。

これに対して、地盤構造物を対象としたライフサイクルコスト LCC の基本概念あるいは、その算定方法については、未だ確立されていない。また、ライフサイクルコ

表-1 道路構造物を構成するコンポーネント・材料⁴⁾

コンポーネント	サブコンポーネント	構成材料
橋 梁	上部工	コンクリート
		メタル
	下部工（橋脚）	コンクリート
		メタル
	下部工（基礎）	地盤 / 基礎工
路 面	路面舗装	コンクリート アスファルト
	路 床	路盤材料
	基礎地盤	地 盤
トンネル	覆 工	コンクリート
	背面地山	地 盤
斜 面	-	地 盤

スト LCC の算定段階で考慮すべき不確実性要因および、そのリスク工学を用いたモデル化手法についても未だ十分な検討がなされているとは言い難い。

このような観点から、本研究においては、対象構造物として道路に隣接する斜面を想定し、また自然ハザードとして降雨を対象とし、そのハザードの到来に対する将来状態予測に関して、リスク工学を援用した評価手法を提案する。さらに、本手法により算定される貨幣単位で表現されたリスク算定結果を用いたライフサイクルコスト LCC を指標として、費用対効果を考慮した道路斜面に対する最適な維持補修計画を立案する方法論の適用性について検討を加えるものである。

2. 土木構造物の維持・補修に関する研究の基本概念

本章では、土木構造物の維持・補修に関する研究の基本概念を示すため、土木構造物の内で現在最もアセットマネジメントの概念が提要されつつある道路構造物を対象として解説を加える。

道路構造物とは、橋梁・路面・トンネル・斜面という各コンポーネントから構成されるものである。さらに、各コンポーネントを、材料で分類すれば表-1 に示すように分類される⁴⁾。

同表に示される各コンポーネントの内で、前述のように、橋梁・路面については、1.において述べたように、事業者毎に規定された点検フォーマットに基づく現地での点検結果の指標に対して、回帰曲線モデルあるいはマ

ルコフ過程に代表される確率過程モデルを用いてに将来状態を予測する方法が用いられることが多い。ただし、ここで留意すべきことは、これらの将来状態予測モデルを用いた手法では、原位置での点検により得られる指標に対して、自然ハザードの到来に対する構造物の力学的応答あるいは安定性とは独立に、補修を実施するための性能限界としての臨界値を定めるという考え方が適用される場合が多い。もちろん、このようなモデル化の下での最重要検討課題は、点検結果に基づき点検間隔（あるいは点検時期）および補修を実施すべき臨界値をどのように最適化するかという問題となる。なお、このような手法の長所は、劣化あるいは性能低下の指標となる点検結果が直接計測可能であるため、回帰曲線モデルあるいは確率過程モデルに含まれるパラメータの更新が可能であり、長期に渡るライフサイクルコスト LCC 算定の精度向上が可能となることである。

これに対して、斜面に代表される地盤構造物においては、前述のように材料の劣化が明瞭でないことから、橋梁・路面と同様の手法を適用することは適切でない。したがって、地盤構造物を長期に渡り供用するものとした場合に、その維持・補修に関しては自然ハザードの到来に対する将来状態予測を主眼とせざるを得ない。なお、斜面に関する原位置での点検結果に関する評価点が与えられている場合もあるが、この評価点については現状では自然ハザードの到来との関係が明確には関連付けられていない。このため、地盤構造物の点検結果に基づく評価点と、自然ハザードの到来に対する構造物の力学的応答あるいは安定性を関係付ける研究も、今後重要な検討課題となるものと推察される。

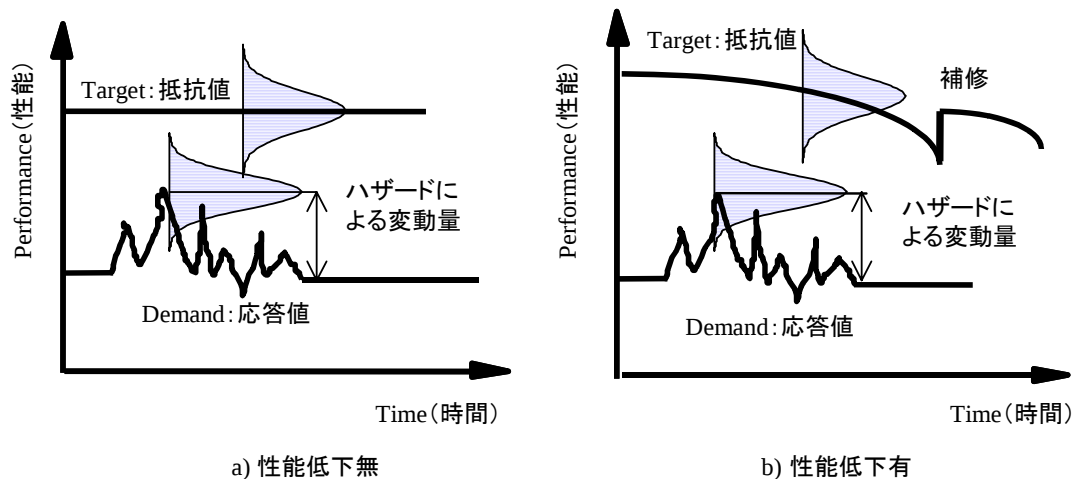


図-1 信頼性解析に基づく構造物の維持・補修に関する基本概念（模式図）

このような観点から，本研究では地盤構造物の維持・補修に関する検討として，ハザードの到来を対象とした将来状態予測に関する信頼性解析手法の適用性について述べる．

ここで，現状での信頼性解析に基づく構造物の維持・補修に関する基本的な考え方は，図-1 の模式図に示すように，性能が強度により規定されるとした場合に，その性能が時間空間で一定値すなわち性能低下しないタイプと，時間とともに性能が低下するタイプに分類される．なお，図-1 に示すモデル図で，リスクを算定する上での不確実性要因は，以下の2つの事項である．

材料の力学特性

到達すると想定される自然ハザードレベル

表-1 に示す道路構造物の各コンポーネントに対する現状でのリスク評価では，斜面は図-1a)に示す性能が低下しないタイプとして分類されるであろう．一方，橋梁・トンネルについては，敢えてこのような分類をすれば，図-1b)に示す性能が低下するタイプと捉えられるであろう．

なお，本研究では，斜面のような地盤構造物は図-1a)に示す性能が低下しないタイプとして分類したが，例えば斜面での対策工の性能低下が想定される場合には，図-1b)に示す性能が低下するタイプとしてモデル化することは本質的には可能である．

3．地盤構造物のライフサイクルコストの算定モデル

本章では，ハザードの到来を対象とした将来状態予測としてのリスク評価手法および，リスク規範での地盤構造物のライフサイクルコスト LCC の算定方法について示

すものとする．

(1) 年間リスクの算定方法

ここでは，一般的な地盤構造物を想定して，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⁹⁾．

まず，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 C_j ($j=1, J$) とする．次に，設計強度 x およびハザードレベル 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き確率を $P_j(x, \alpha)$ とすると，構造物に損傷モード j の破損が生じる条件付き確率 $\Phi_j(x, \alpha)$ は，以下のように定義される．

$$\Phi_j(x, \alpha) = P_j(x, \alpha) - P_{j+1}(x, \alpha) \quad (1 \leq j < J) \quad (1)$$

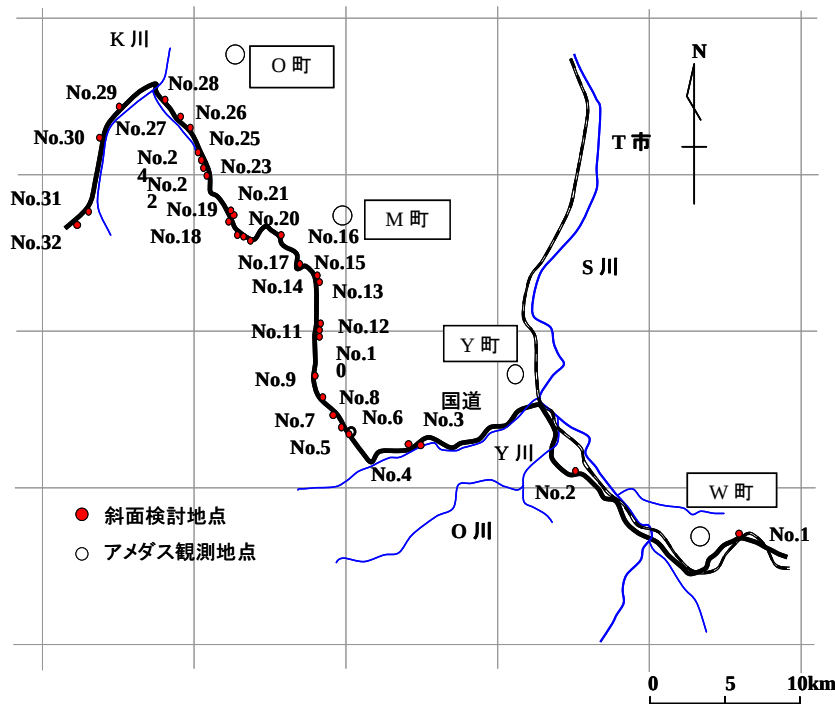
$$\Phi_J(x, \alpha) = P_J(x, \alpha) \quad (2)$$

また，式(1)および式(2)より，条件付き損失期待値 $R(x, \alpha)$ は，以下のように表される．

$$R(x, \alpha) = \sum_{j=1}^J C_j \cdot \Phi_j(x, \alpha) \quad (3)$$

次に，ハザード曲線において，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，地震の発生確率密度 $\varphi(\alpha)$ と次式のように関連付けられる．

$$1 - \Psi(\alpha) = \int_0^{\alpha} \varphi(X) dX \quad (4)$$



注) 図中の No. ○ 内の数字は斜面番号を示す。

図-3 降雨観測地点と評価対象斜面

ことに要する期待費用（累積損失期待値と等価） $R_3(x)$ は、式(3)あるいは式(6)の定義と同様に、累積破壊確率と累積損失の積の和として算定されるが、その結果を整理すると次式のように算定される。

$$R_3(x) = p_a \cdot C \left\{ 1 + \frac{1}{1+\rho} + \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

ここで、 $p_a C$ が単一な破壊モードでの年間リスクに相当することに注意すれば、供用年数を n と拡張した場合の、 n 年間の累積損失期待値 $R_n(x)$ は次式となる。

$$R_n(x) = R_a \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1} \quad (9)$$

なお、社会的割引率 ρ は、日本では $\rho=0.04$ と設定されるのに対して、開発途上国では一般的に $\rho=0.12$ 程度に設定される^{9),7)}。このため、累積損失期待値の現在価値は、開発途上国では日本の $1/3$ ($=0.04/0.12$) 程度となる。

したがって、構造物を供用後 n 年時でのライフサイクルコストの期待値 $LCC_n(x)$ は、次式のように表される。

$$LCC_n(x) = \sum_{i=1}^n I(i) \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1} + R_a \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1} \quad (10)$$

ここに、 $I(i)$ は構造物の供用期間中において、設計強度 x を高めるために、 i 期において投資される維持補修費用を表す。

したがって、～ に示す仮定条件の下では、地盤構造物のライフサイクルコストの期待値は、式(10)に示すように、社会的割引率を考慮した、維持補修コストと累積損失期待値を加えたものとして表される。

4. 解析事例

3. に示した地盤構造物のライフサイクルコストの算定方法の適用性について、これまでに筆者らが示してきた斜面リスクの算定結果⁹⁾を用いて検討を加える。

ここに取り上げるリスク算定事例は、図-3 に示す国道に隣接する 32 箇所の斜面を対象とし、図-4 に示すようなアメダス観測箇所毎に賛成した降雨を自然ハザードを用いて、式(1)～式(6)に示す手順に基づき災害リスクを評価したものである。なお、破壊確率の算定において、図-5 に示す降雨に伴う表層崩壊を想定し、次式に示す性能関数を用いる。

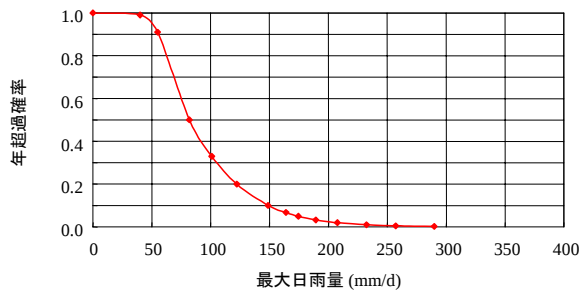


図-4 ガンベル分布に基づき算定された降雨ハザード曲線の事例 (Y町)

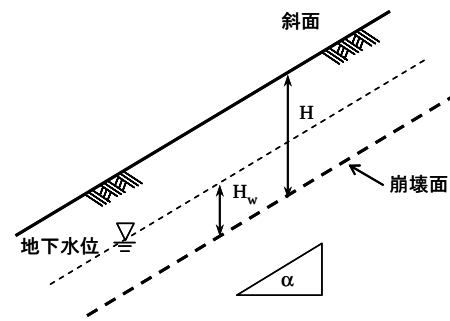


図-5 表層崩壊モデル

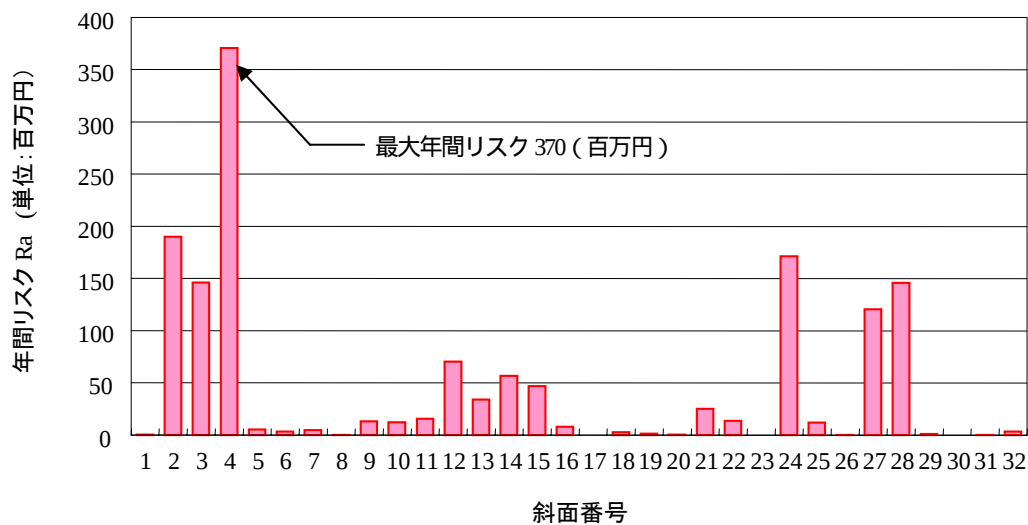


図-6 年間リスクの評価結果

$$Q = \left(1 - \frac{\gamma_w H_w}{\gamma H} \right) \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{c}{\gamma H} \cdot \frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha} - 1 \quad (11)$$

ここで、 γ_w は水の単位体積重量、 γ は土の単位体積重量、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 α は無限斜面の傾斜角、 H は表層土の層厚、 H_w は表層土中の水深を表わす。式(11)に対して、粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を確率変数とし、一次近似二次モーメント法 FOSM により破壊確率を算定する。

なお、この解析条件については文献 8) を参照されたいが、結果として得られた 32 箇所の斜面毎の年間リスクを図-6 に示す。同図に示すように、斜面 No.4 の年間リスクが約 370 百万円で最大であり、斜面補強する優先順位が 1 位と判定される。

次に、この斜面 No.4 における年間リスクの最大値を用いて、社会的割引率 $\rho=0.04$ として、式(9)および式(10)に基づき供用後 n 年時でのライフサイクルコストの期待値

$LCC_n(x)$ を試算する。

ここで、式(9)および式(10)に含まれる社会的割引率 ρ のライフサイクルコストの算定結果に及ぼす影響について、斜面 No.4 の斜面に対して斜面補強せず長期に渡り供用する場合（以下無対策と称する）を用いて検討を加える。前述のように、社会的割引率 ρ は、日本および開発途上国では、それぞれ $\rho=0.04$ および $\rho=0.12$ 程度に設定される。図-7 は、この 2 種類の社会的割引率 ρ を適用した場合の、無対策でのライフサイクルコストの期待値の相違について示したものである。同図に示すように、2 種類の社会的割引率 ρ に対する結果の比較で、経過年数 5 年以内では両者に明確な相違は生じていない。これに対して、経過年数 5 年以降では、ライフサイクルコストの期待値は、開発途上国に対応する社会的割引率 $\rho=0.12$ の場合には急激に収斂する傾向を示すのに対して、日本に対応する社会的割引率 $\rho=0.04$ の場合には緩やかに増加する傾向を示す。この比較結果より、先進国と開発途上国での構造物のアセットマネジメントに対する姿勢として、

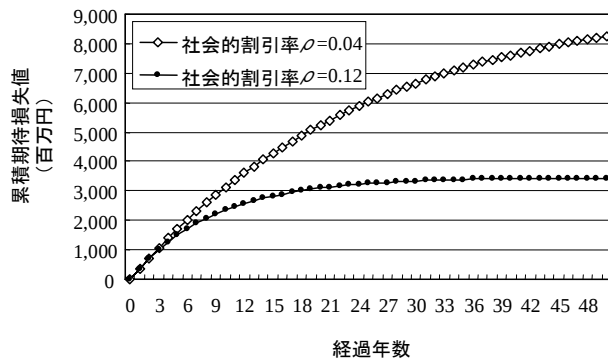


図-7 期待累積損失算定結果における社会的割引率の影響

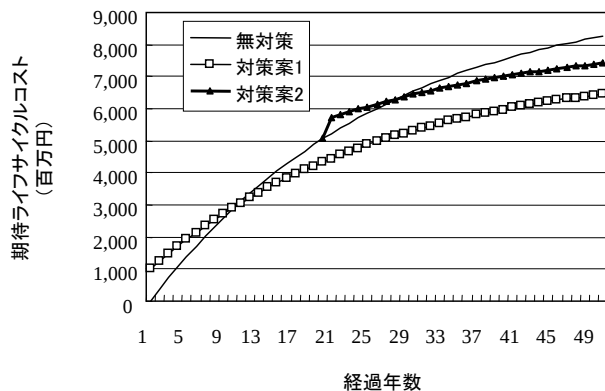


図-8 期待ライフサイクルコストの経時変化の比較

以下のような相違が生じることが推察される。すなわち、開発途上国では、経済成長あるいはインフレの発生等を考慮することで社会的割引率が大きくなることから、ライフサイクルコストの期待値の増加はある程度小さくなる。このため、構造物を補強しながら長期に渡り供用するよりは、むしろ構造物を比較的短期間で更新あるいは改築することが得策となる。これに対して、日本のような先進国においては、現状でのリスクが比較的大きい構造物では、ライフサイクルコストに占める累積損失期待値が大きくなるため、開発途上国とは異なり構造物を補強しながら長期に渡り供用の方が得策となる。すなわち、先進国では、開発途上国に比べて構造物のアセットマネジメントの重要性が高いということになる。

以上の議論は、次に式(10)における斜面補強に対する投資の項を評価しないものであった。次に、社会的割引率 $\rho=0.04$ のとした場合での、式(10)に基づく斜面補強に対する投資の項を評価した場合のライフサイクルコストの評価を行う。

ここで、斜面補強策として、以下の2種類の対策案を想定する。

- ・対策案1

初期対策費として500百万円を投資し、その対策に

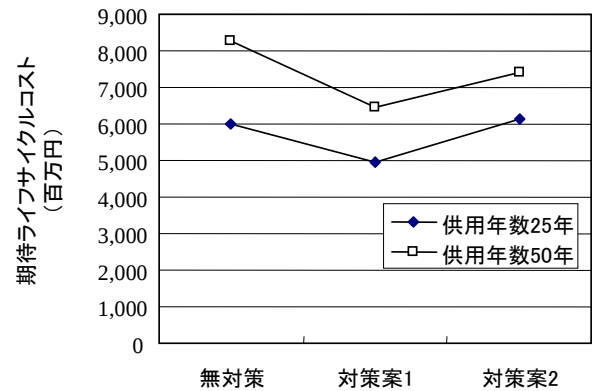


図-9 供用年数を規定した場合の期待ライフサイクルコストの比較

より当初の年間リスクを1/3だけ低減する。

- ・対策案2

20年後の対策費として1,000百万円を投資し、その対策により当初の年間リスクを1/2だけ低減する。

上記の2種類の対策案に無対策も合わせた、3種類のライフサイクルコストの期待値の経時変化を図-8に示す。図-8に示す結果において、各ケースでの対策費用は式(10)の第1項として社会的割引率 ρ を含めて評価した。なお、斜面補強対策による年間リスクの低減額は、上記のようにあくまで仮定したものであり、試算として示したものに過ぎないことに留意されたい。もちろん、この対策工を施工することによる年間リスクの低減効果は、本質的には性能関数を適切に設定することにより定量化は可能である。しかし、本研究の目的は、地盤構造物を対象としたライフサイクルコストの算定方法について示すものであるため、対策工の効果に関する詳細な評価・検討については言及しないものとする。

次に、図-8に示す3種類のライフサイクルコストの期待値の経時変化を用いて、斜面の供用年数が規定されている場合のアセットマネジメントにおける意思決定手法についても言及する。図-9は、図-8に示す3種類のライフサイクルコストの期待値の経時変化から、供用年数をそれぞれ25年および50年と規定した場合の、3種類の対策でのライフサイクルコストの期待値を比較したものである。同図に示すように、いずれの供用年数に規定した場合にも、対策案1でのライフサイクルコストの期待値が最小となることが明らかとなることから、ライフサイクルコストの期待値を指標として、最適な斜面对策費を評価することが可能となる。

もちろん、本研究において示した対策案を決定する事例は限定された条件の下での議論ではあるが、より一般的な問題においても、式(10)に示す対策工に対する投資をキャッシュフロー分析と同等にモデル化した本手法は有

効であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、成熟型社会における構造物の維持・補修・更新の最適化という課題に対処する方法論として、従来の技術論に基づく検討に加えて戦略的に維持補修予算投資を決定するというアセットマネジメントという観点からの検討が注目を集めつつある中で、橋梁・舗装に異なり地盤構造物を対象としたアセットマネジメント手法が未だ確立されていないことを明らかにした。そして、この課題に対処するため、以下に示す仮定条件の下で、地盤構造物を対象としたアセットマネジメント手法として、その意思決定の指標となる期待ライフサイクルコストを評価する手法を提案した。

地盤構造物を供用する期間での自然ハザードの到達確率は同じである。

地盤構造物の供用期間は無限であり、破壊してもすぐに原形復旧して供用する。

地盤構造物を原形復旧する際に、構造物の強度は全く破壊する前と同等とする。

もちろん、上記の ～ に示した仮定条件は、現実離れしたものと解釈される可能性がある。例えば に示した完全修復モデルを用いているように、現実には斜面崩壊後には、以前の状態より高い強度で修復されることが一般的であることから、この仮定条件の妥当性に疑問があるとも言える。しかし、このような課題は、図-2 に示したライフサイクルを評価する確率過程モデルにおいて、斜面が崩壊した後に適用する期毎の年間破壊確率を変化

させることで対処可能である。このような観点から、本研究に示したライフサイクル評価モデルは、地盤構造物におけるアセットマネジメントを立案する第一次近似手法として位置付けられるであろう。

こうした課題を踏まえた上で、提案する手法に基づき、降雨を自然ハザードとして選択し、国道に隣接する斜面に対するライフサイクルコストの期待値を算定した。この算定結果より、本研究において提案した手法により、地盤構造物に対しても、橋梁・舗装と同様に、期待ライフサイクルコストを指標として、最適な斜面对策費を評価することが可能となることを明らかにした。

参考文献

- 1) Mamoru Mizutani: A Maintenance Planning Method (MPM) for deteriorating structures, Structural Safety and Reliability, ICOSSAR '97, Vol. 1, pp. 443-450, 1997.
- 2) 黒田勝彦, 内田敬: 土木構造物の補修・更新投資モデル, 土木計画学研究講演集11, 1988.
- 3) 田村謙介, 小林潔司: 不確実性下における道路舗装の修繕ルールに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No.18(1), pp.97-107, 2001.
- 4) 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.
- 5) 大津宏康, 大西有三, 西山哲, 竹山雄一郎: 岩盤崩落による社会経済的損失を考慮したリスク評価に関する研究, 土木学会論文集No.708/ -59, pp. 187-198, 2002.
- 6) 嘉数啓, 吉田恒明: アジア型開発の課題と展望, 名古屋大学出版会, 1997.
- 7) 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, 1998.