

グラウンドアンカーの性能低下を考慮した岩盤斜面のライフ サイクルコスト評価に関する一提案

A PROPOSAL ON LIFE CYCLE COST EVALUATION OF ROCK SLOPES CONSIDERING PERFORMANCE DETERIORATION OF GROUND ANCHOR

大津宏康*・松山裕幸**

Hiroyasu OHTSU, Hiroyuki MATSUYAMA

This paper presents the basic methodology on life cycle cost evaluation of rock slopes considering performance deterioration of ground anchor. First, in order to impress focal point discussed in this paper, the basic concept modeling performance deterioration of ground anchor is presented. Secondly, the basic procedure to evaluate life cycle cost, LCC, of rock slopes based on risk caused by natural hazard is presented. Finally, results of LCC evaluation of a simple rock slope make it clear that the proposed methodology is very effective to implement maintenance management plan of rock slopes reinforced by ground anchor.

Key Words: rock slopes, ground anchor, risk, asset management, life cycle cost

1. はじめに

昨今、少子高齢化という成熟型社会の到来に伴い、予算制約条件下で総合的な観点から土木構造物の維持補修問題の最適化を図るという課題に対処する方策として、アセットマネジメントという考え方が注目されるようになってきた。ただし、現状において土木構造物のアセットマネジメントという考え方が実際に適用されつつある構造物は、道路舗装あるいは橋梁関係に限定されており、その他の構造物については未だ立ち遅れている。中でも、岩盤構造物については、アセットマネジメントという観点からの研究は、未だほとんどなされていないと言えるであろう¹⁾。

ここで、アセットマネジメントの基本概念とは、本質的には技術的な観点からの検討事項である構造物（資産）マネジメントシステムに、社会経済的な観点からの検討事項となる資産会計システムを連動させることが可能となる総合的なマネジメントシステムを構築するものと位置づけられるであろう。さらに、技術的な検討事項である構造物（資産）マネジメントシステムとは、以下のようなサブシステムにより構成されるであろう²⁾。

- ① 構造物の性能、機能水準の現在状態の規定
- ② 構造物の性能低下あるいはハザードの到来に対する将来の状態の予測
- ③ 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

*正会員 博士（工学） 京都大学国際融合創造センター

**正会員 日本道路公団試験研究所

上記の事項の内、現在アセットマネジメントに関して先行する分野では、③の事項に関連する意思決定の指標としては、ライフサイクルコスト（以下 LCC と称する）を用いることが一般的である。したがって、岩盤構造物におけるアセットマネジメントに関する概念を構築するためには、構造物の性能低下過程を考慮した貨幣価値に基づく LCC を算定する手法を開発することが不可欠となる。

このような観点から、本研究では岩盤斜面を対象とし、構造物の性能低下過程を考慮した LCC の算定手法について提案するものである。なお、岩盤斜面を対象とした場合の斜面構造物の性能低下要因としては、様々な事項が想定されるが、本研究では補強材であるグラウンドアンカーの定着部の腐食に起因する性能低下すなわち、導入力の時率的減少に着目する。この理由は、グラウンドアンカーが永久構造物として必要な耐久性（防食）に関する性能保証は、文献 3）に示す基準が制定されてからであり、本研究で取り扱う規定制定前に設置されたグラウンドアンカー（以下「旧タイプアンカー」と称す）では、定着部の腐食に起因する導入力の時率的減少が確認されているためである。また、旧タイプグラウンドアンカーが設置された仮定の斜面を例題として、提案する手法に基づく LCC の算定結果を示し、本手法の有効性を示すものとする。

2. 構造物の性能低下を考慮した LCC 算定モデル

(1) グラウンドアンカーの性能低下モデル

グラウンドアンカーの設計では、その導入力の算定において円弧すべり、平面すべり等の極限平衡法が用いられることが一般的である。例えば、その斜面の安定性評価の指標となる安全率は、すべり抵抗力 R とすべり力 S の比として表わされる。言うまでもなく、グラウンドアンカーの導入力は、すべり面の土塊重量に起因するすべり力に対する抵抗力に寄与する項となる。

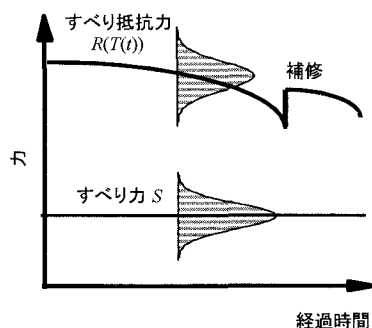


図-1 すべり力・抵抗力の変動（模式図）

ここで、グラウンドアンカーの導入力が何らかの要因によって打設後の経過時間と共に減少するとすれば、すべり抵抗力 R がグラウンドアンカーの導入力 $T(t)$ に連動した時間の関数 $R(T(t))$ となり、図-1 の模式図に示すように安全率も時間の関数となる。

さらに、安定性評価式に含まれる各解析パラメータの内、粘着力および内部摩擦角のような強度定数の分布を正規分布等によりモデル化される確率変数とすると、図-1 に示すように抵抗力およびすべり力共に確率量となり、その安全率 $FS(t)$ および破壊確率を算定するための性能関数 $Q(t)$ は、それぞれ次式のように表わされる。

$$FS(t) = R(T(t)) / S \quad Q(t) = R(T(t)) - S \quad (1)$$

したがって、グラウンドアンカー1 本当りの導入力の時間的低下がモデル化されたならば、安全率および破壊確率のような斜面の安定性を表わす指標の時変化が表現可能となる。

グラウンドアンカーの性能低下については、PC 鋼材のクリープ（またはリラクゼーション）あるいはグラウンドアンカーの腐食による断面欠損等の様々な要因が想定されるが、現段階において確定した見解はまとめられていない。このため、これらのグラウンドアンカーの性能低下に関わる様々な要因の内、本研究ではグラウンドアンカーの腐食による断面欠損に着目する。筆者らが取りまとめた既設の旧タイプアンカーを対象とした調査結果より得られた知見は、以下のように要約される。

- ・図-2 に各工法とも防食構造がほぼ同一な頭部背面のテンドンの断面欠損率と施工後の経過年数の関係を示す。この関係について指数関数による回帰式を算定すると、旧タイプアンカーの頭部背面部では、施工後 38 年程度で設計アンカー力（後述する断面欠損率 22.5% に相当）を下回る機能になるものと推察される。

・図-3 に現場から採取した鋼材の引張荷重と JIS の規格引張荷重の比と断面欠損率の関係を示す。旧タイプアンカーの機能低下の下限を規格引張荷重の 60% (設計アンカー力) とすると、限られた情報ではあるが、得られた結果を最小自乗法により線形回帰式を推定すると、許容される鋼材の断面欠損率は 22.5% となる。本来は、断面欠損率が 40% のときに鋼材の規格引張荷重は 60% になるはずであるが、それより小さい欠損率で規格引張荷重の 60% に達するのは、腐食によりほとんど塑性変形を伴わず破断に至るためと推察される。

もちろん、以上の推定はいずれも限られた情報に基づくものであり、今後計測値を増やすことで精度向上を図ることが必要であることは言うまでも無い。

以上の知見に基づけば、式(1)に含まれる時間的低下を考慮したグラウンドアンカー1本当たりの導入力 $T(t)$ は、以下の手順で定量化されるものと仮定する。

まず、図-2 に示す指数関数による回帰式より、施工後の経過時間 t における断面欠損率 $\lambda(t)$ を設定する。次に、図-3 に示す線形回帰式より、経過時間 t において期待されるグラウンドアンカーの導入力 $T(t)$ を、次式により設定する。

$$T(t) = \mu(t)T_0 \quad \mu(t) = f(\lambda(t)) \quad (2)$$

ここに、 $\mu(t)$ はアンカー引張力の低減係数、 $f(\lambda(t))$ は断面欠損率 $\lambda(t)$ に対するアンカー引張力の低減係数を表わす関数、 T_0 は初期導入力を表わす。

したがって、式(2)に基づき設定されるグラウンドアンカー1本当たりの導入力 $T(t)$ を式(1)に代入することで、グラウンドアンカーの腐食による性能低下の時間変化を考慮した斜面の安定性評価が可能となる。なお、式(2)はグラウンドアンカー1本毎での性能低下を表わしているが、1断面に複数のグラウンドアンカーが設置されている場合には、各グラウンドアンカーの低減率は、設置後の経過時間に応じて設定することとなる。

(2) ライフサイクルコスト評価モデル

(1)に示した手順により、グラウンドアンカーの性能低下を考慮した斜面の安定性評価が可能となるため、自然災害ハザードを考慮したライフサイクルコストの評価が可能となる。すなわち、性能低下を考慮したグラウンドアンカーの導入力 $T(t)$ が年単位で評価された場合には、その自然災害ハザードを考慮した場合の、供用後 i 年後の年間破壊確率 p_{ai} および年間損失期待値 (リスク) R_{ai} は、次式により表わされる。

$$p_{ai} = - \int_0^{\infty} p_i(\alpha) \frac{\partial \Psi(\alpha)}{\partial \alpha} d\alpha \quad R_{ai} = - \int_0^{\infty} R_i(\alpha) \frac{\partial \Psi(\alpha)}{\partial \alpha} d\alpha \quad (3)$$

ここに、 $p_i(\alpha)$ および $R_i(\alpha)$ は、それぞれ供用後 i 年後にハザードレベル α (例えば、地震動として水平震度を作用させる場合には、水平震度 k_h の大きさに相当) の自然災害ハザードが到達した場合の、斜面の条件付破壊確率および、その破壊に伴う条件付斜面災害リスク (損失期待値) を表わす。

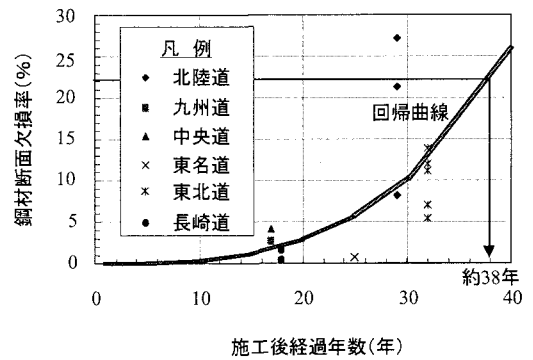


図-2 施工後経過年数と鋼材断面欠損率の関係

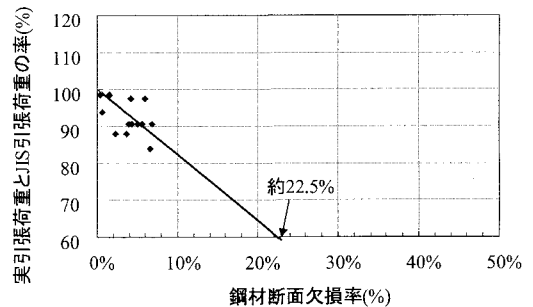


図-3 引張荷重比と鋼材断面欠損率の関係

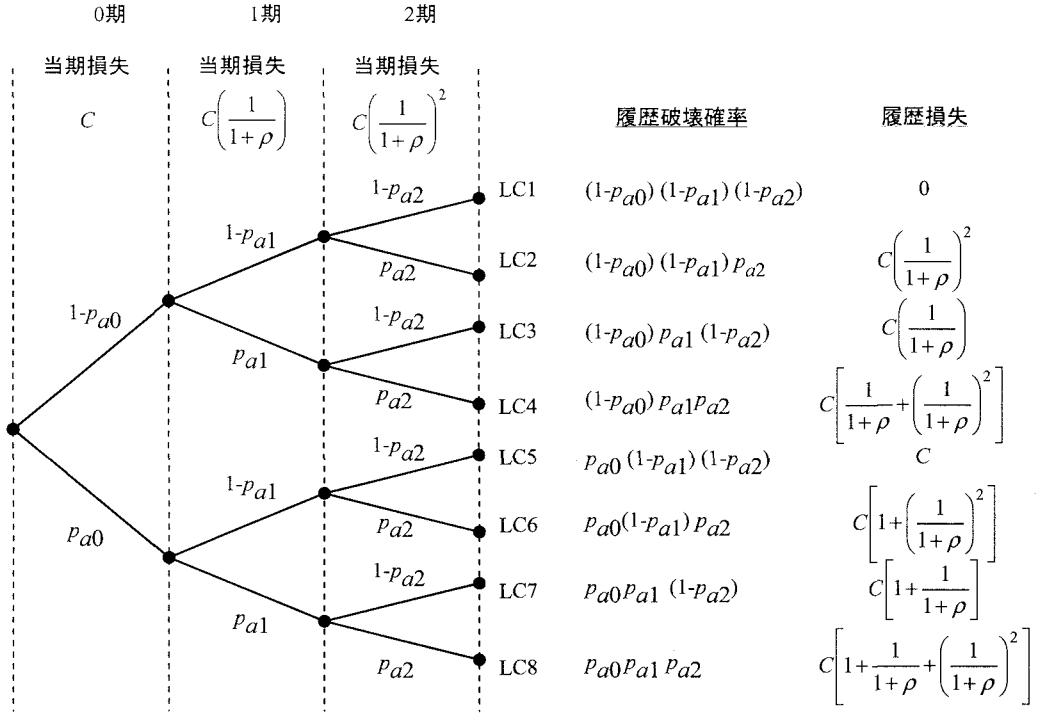


図-4 ライフサイクル算定モデル（供用期間3年の事例）

なお、条件付斜面災害リスク（損失期待値） $R_i(\alpha)$ は、工学分野の定義として、 $p_i(\alpha)$ とそれに伴い発生する損失（貨幣単位）の積として定義されるものであり、 $\Psi(\alpha)$ は1年間にハザードレベル α 以上の自然災害ハザードが発生する超過確率（年間超過確率）を表わすものである。

次に、式(3)に示す年間破壊確率 p_{ai} に基づき、斜面構造物のLCCを算定する上で、以下のような仮定条件を設ける。

- ① 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。
- ② 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。
- ③ 地盤構造物を原形復旧する際に、構造物の強度はその斜面が破壊する直前の状態と同じとする。

この仮定条件の下でのLCCの算定過程を明らかにするために、構造物の供用期間を3年とした場合の簡易な事例を図-4に示す。同図に示すように、供用期間3年の場合には、LC1～LC8の8通り（ 2^3 通り）の供用シナリオが想定され、それぞれのLCCシナリオに対する累積の破壊確率および損失の積の総和となる累積損失期待値（リスク） R_3 は次式のように算定される。

$$R_3 = p_{a0} \cdot C + p_{a1} \cdot C\left(\frac{1}{1+\rho}\right) + p_{a2} \cdot C\left(\frac{1}{1+\rho}\right)^2 \quad (4)$$

ここに、 ρ は社会的割引率を表わす。なお、社会的割引率は、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、開発途上国では0.12、そして日本では0.04に設定されることが一般的である⁴⁾。

ここで、 $p_{ai}C$ がそれぞれ*i*年後のグラウンドアンカーの性能低下の状態に対する年間リスク R_{ai} に相当す

ることに注意すれば、供用年数を n と拡張した場合の累積損失期待値（リスク） R_n は次式となる。

$$R_n = \sum_{i=0}^n R_{ai} \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^i \quad (5)$$

次に、グラウンドアンカーの性能回復過程すなわち維持補修計画のモデル化について述べる。

グラウンドアンカーの維持補修計画については、以下のような基本方針に基づきモデル化する。

- 1) グラウンドアンカーの 1 本当りの導入力の低減係数 $\mu(t)$ の値が、限界状態 μ_c に達すればグラウンドアンカーを引抜き更新するものとする。その更新により、グラウンドアンカーは初期の性能を回復する。
- 2) グラウンドアンカーの更新後の性能低下状況は、初期状態から同じとする。

このモデル化において、限界状態 μ_c をパラメータとすることで、グラウンドアンカーの補修を考慮した LCC を算定する。ここで、式(2)に示すように、アンカー引張力の低減係数 $\mu(t)$ は時間の関数として与えられることから、限界状態 μ_c を規定することは、何年毎にグラウンドアンカーを引抜き更新することと等価となる。したがって、更新過程を考慮した年間破壊確率を総称して p_{ai}^* と標記すると、斜面を N 年間供用する場合のライフサイクルコスト LCC_N は、以下のように算定される。

$$LCC_N = \sum_{i=0}^n p_{ai}^* C \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^i + \sum_{i=1}^n I(i) \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^i \quad (6)$$

ここに、 $I(i)$ は、供用期間中にグラウンドアンカーを引抜き更新する場合に要する費用を表す関数である。

ただし、図-2 および図-3 に示すグラウンドアンカーの性能低下特性は、前述のように旧タイプアンカーに対応するものであり、上記の仮定条件の下で算定される LCC は、旧タイプアンカーのみに適用可能であることに留意されたい。

以上の枠組みにおいて、限定された条件での議論ではあるが、図-4 の模式図に示す二項過程により算定される累積損失期待値（累積リスク）に基づき算定される LCC を判断指標とした、適切な旧タイプアンカーの維持補修計画の立案が可能となる。

3. 解析事例および考察

(1) 解析条件

2. に示した手法に基づき、図-5 に示す仮想の斜面を例題として、グラウンドアンカーの性能低下特性を考慮した場合の、ライフサイクルコストを算定する。図-5 に示す平面すべりモデルでは、自然災害ハザードとして水平震度による地震力を想定した場合には、式(1)に相当するすべり力 S およびすべり抵抗力 $R(t)$ は、それぞれ以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} R(t) &= W(\cos \phi_1 - k_h \sin \phi_1) \tan \phi + \frac{cH}{\sin \phi_1} + T(t) \cos(\phi_1 + \phi_2) \\ S &= W(\sin \phi_1 + k_h \cos \phi_1) \\ W &= \frac{1}{2} \gamma H^2 \left(\frac{1}{\tan \phi_1} - \frac{1}{\tan \theta} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 W はすべり土塊の自重、 γ は単位体積重量、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 k_h は水平震度、 H は斜面高、 θ は斜面傾斜角、 ϕ_1 はすべり面角度、 ϕ_2 はグラウンドアンカー打設角を表す。式(7)に示す各パラメータの内、ここでは強度定数 (c , ϕ) のみを確率変数とし、具体的には表-1 に示すように正規分布によりモデル化されるものと仮定する。また、その他の各パラメータは、単位体積重量 $\gamma=23\text{kN/m}^3$ 、斜面高 $H=20\text{m}$ 、斜面傾斜角 $\theta=60^\circ$ 、すべり面角度 $\phi_1=30^\circ$ 、グラウンドアンカーの打設角 $\phi_2=30^\circ$ の確定値とす

表-1 地盤パラメータ

パラメータ	平均値	変動係数
粘着力 c	10kN/m ²	0.10
内部摩擦角 ϕ	35.0°	0.077

る。

なお、グラウンドアンカーの導入力 $T(t)$ については、その初期導入力 T_0 が、表-1 に示す強度定数の平均値を用い、かつ水平震度 k_h が 0.10 の条件で、安全率がほぼ 1.20 になる条件から $T_0=0.5\text{MN/m}$ と設定する。また、その後の変動過程は図-6 に示すように設定する。このモデル化の過程は以下のように要約される。

- ・断面欠損率 $\lambda(t)$ は、図-2 に示す経過年数と鋼材断面欠損率の指数関数で回帰した関係を簡素化し、施工後 15 年間は全く鋼材断面欠損が生じないとして、その後は欠損率 0.0% から 38 年で断面欠損率 22.5% まで線形的に増加するものと仮定する。
- ・アンカー引張力の低減係数 $\mu(t)$ は、図-3 に示す線形回帰式に基づき、設定された断面欠損率 $\lambda(t)$ に応じて設定する。

また、水平震度による地震力に関するハザード曲線⁵⁾は、図-7 に示す関係を用いる。グラウンドアンカーの当初の設計条件である、水平震度 $k_h=0.10$ および表-1 に示す強度定数の平均値に対して、図-6 に示すグラウンドアンカーの導入力の変動を考慮した場合に安全率の経時変化を図-8 に示す。同図に示すように、安全率の平均値（中央安全率）は、グラウンドアンカーの性能低下に伴い、約 1.20 から 1.155 へと約 7% 程度減少することになる。なお、図-2 および図-3 に示すように旧タイプアンカーが施工後 38 年程度で設計アンカー力を下回ると推定されることから、以後 LCC を検討する経過年数の上限を 40 年に設定する。

次に、斜面破壊に伴う損失 C は、筆者ら⁶⁾ がこれまでに示してきたように、対象とする斜面の破壊規模、道路のネットワーク状況を考慮して評価される、直接損失および間接損失となる社会経済的損失の和として算定される。しかし、本研究はあくまで仮定の斜面を対象としているため、試算として 10 億円と設定する。また、グラウンドアンカーの補修費も同様に試算として 1 本当たり 100 万円と設定する。

(2) 解析結果

(1) に示した解析条件の下で、一次近似二次モーメント法 FOSM により、供用後 i 年後のグラウンドアン

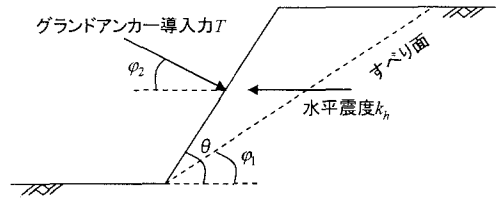


図-5 LCC 算定例題斜面モデル図

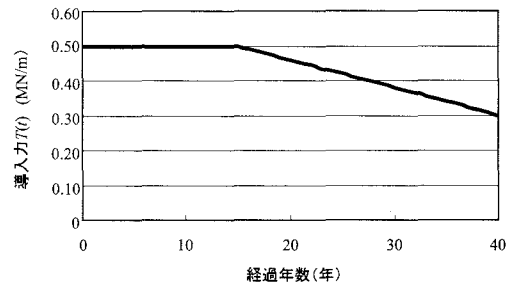


図-6 グラウンドアンカー導入力の変動モデル

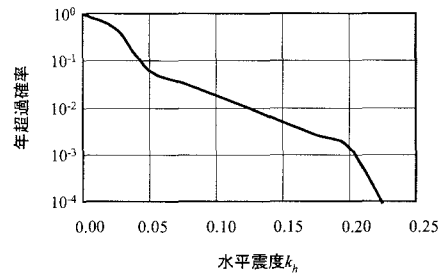


図-7 地震ハザード曲線⁵⁾

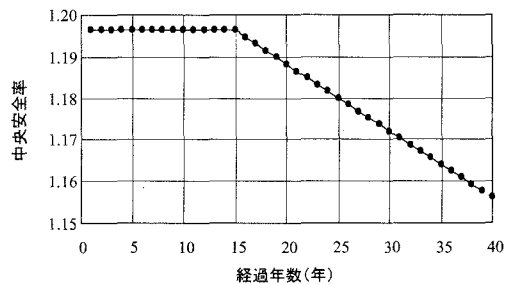


図-8 中央安全率の経時変化

カーの導入力の変動を考慮した、様々な水平震度 k_h に対する条件付破壊確率および条件付リスクを算定し、さらに式(3)に基づき年間破壊確率および年間リスクを算定する。

その結果として、グラウンドアンカー設置後の各経過年数に対する年間破壊確率密度（式(3)に示す年間破壊確率 p_{ai} の算定式の右辺積分項に相当）と水平震度 k_h の関係を図-9 に示す。なお、同図では水平震度 $k_h=0.225$ 以上の地震の発生確率が非常に小さくなるため、それに対応する領域での年間破壊確率密度はほぼ 0 となっている。次に、年破壊確率（図-9 に示す各経過年数に対する年間破壊確率密度と水平軸とで囲まれる面積に相当）の経時変化を図-10 に示す。同図に示すように、年破壊確率はグラウンドアンカーの性能低下において、その導入力が増加し始める 15 年以降、年破壊確率が増加する傾向となる。ただし、図-9 に示す経過年数毎の年間破壊確率密度の相違が比較的小さいため、図-10 に示す表示では年破壊確率が増加はわずかであり、ほぼ直線状となることに留意されたい。

次に、式(5)に示した累積リスクについて、グラウンドアンカーの性能低下の有無による相違を明らかにするため、グラウンドアンカーの導入力が増加し始める 15 年以降の経時変化の比較を図-11 に示す。同図に示すように、グラウンドアンカーの性能低下の有無による相違は、経過年数 20 年程度から明らかとなる。そして、40 年経過時点での比較では、累積リスクはそれぞれ 950 万円および 900 万円となり、その相違は約 5% と比較的小さな値となっている。この理由は、本解析において算定したグラウンドアンカーの性能低下の有無による年破壊確率の相違が小さいこと、言い換えれば図-8 に示した中央安全率の低下量が小さいことに加えて、式(5)に含まれる社会的割引率 ρ の影響によるものと推察される。この内、社会的割引率 ρ については、式(5)に示すように等比級数の係数となるため、0.04 という比較的小さな値を用いれば、短期から中期の変動が強調されるため、この問題のように 15 年間は性能低下が発生しないような場合には、性能低下に起因するリスクの増加が薄められる結果となる。なお、前述のように、現状では社会的割引率 $\rho=0.04$ と設定されることが一般的であるが、アセットマネジメントの重要性が唱えられる低成長下では、社会的割引率を 0.04 からより小さな値に設定することが必要となる可能性がある。このため、今後 LCC の評価では、社会的割引率 ρ としてどのような値を適用すべきかの議論することが必要であると推察される。

次に、式(6)に示す関係に基づき、グラウンドアンカーの補修過程を考慮した場合の LCC の算定例として、補修パターン 1（経過年数 20 年後に補修）および、補修パターン 2（経過年数 25 年後に補修）の 2 ケースで

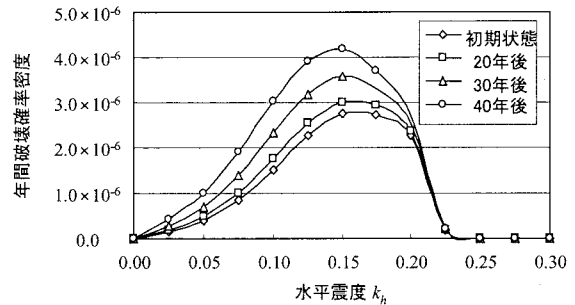


図-9 年間破壊確率密度と水平震度 k_h の関係

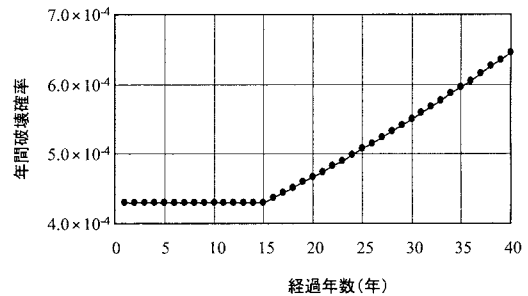


図-10 年破壊確率の推移

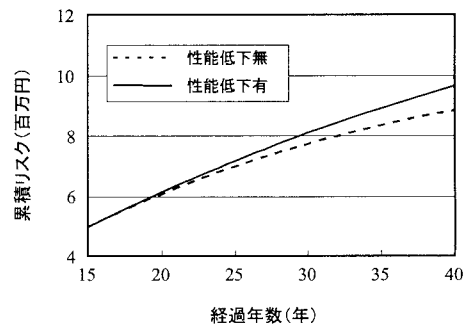


図-11 累積リスクの経時変化

の補修パターンを想定する。上記の2種類の補修パターンでは、図-6に示した関係からグラウンドアンカーの補修を行う限界状態 μ_c (式(2)参照)は、それぞれ0.92および0.84に相当する。上記の補修パターンに加えて、グラウンドアンカーの補修を行わない場合(図-11に示す累積リスクと等価)を含めた、3ケースに対するLCCの経時変化を図-12に示す。なお、同図では経過年数20年以後のみを表示しているため、補修パターン1では20年時点で既にグラウンドアンカーの補修が含まれていることに留意されたい。

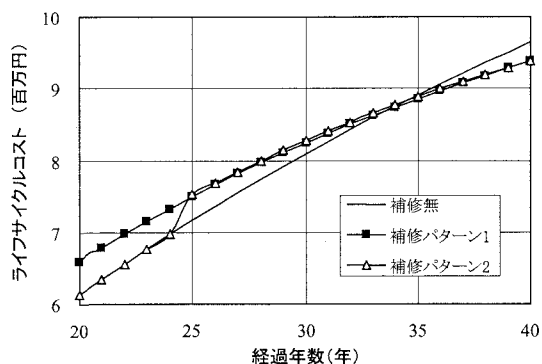


図-12 LCC の比較

図-12に示す結果では、経過年数34年まではアンカーの補修を行わない場合のLCCが最小値となる。そして、経過年数34年以降は、補修パターン1および補修パターン2のLCCがいずれも、アンカーの補修を行わない場合のLCCに比べて小さくなる。ただし、経過年数34年以降では、補修パターン1と補修パターン2のLCCの差異は極めてわずかである。また、補修パターン2では、経過年数25年後にアンカーの補修を行うためアンカーの補修が加えられることになるが、その時点で補修パターン1のLCCとほぼ同じ値となり、その後時間経過に伴う相違もわずかである。この結果より、今後の供用年数が34年までの場合には、アンカーの補修を行わない場合が適切な維持補修計画となり、今後の供用年数が34年以上の場合には、アンカーの補修を行うことが適切な補修計画となる。このように、限定した条件の下ではあるが、本研究で示した旧タイプアンカーの性能低下を考慮した場合のリスク評価を基本としたLCC評価モデルを用いることで、旧タイプアンカーの適切な補修に対する意思決定に資する情報が得られる可能性があることが明らかとなる。

4. まとめ

本研究では、岩盤斜面を対象とし、補強材であるグラウンドアンカーの導入力の経時的減少に着目したLCCの評価方法について示すと共に、その提案する手法に基づく簡易な事例に対するLCCの算定結果についても示した。この結果として、提案するLCC評価モデルを用いることにより、グラウンドアンカーの適切な維持補修計画に対する意思決定に資する情報が得られる可能性があることを明らかにした。ただし、本研究で対象としたグラウンドアンカーの性能低下の特性については限定した情報に基づくものであり、今後本提案手法の精度を高めるため、データの蓄積および分析を図る所存である。

参考文献

- 1) 大津宏康, Nutthapon Supawiwat, 高橋健二: 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, 土木建設技術シンポジウム2004講演論文集, pp.233-240, 2004.
- 2) 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.
- 3) 土質工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 1988.
- 4) 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), 道路投資の評価に関する研究委員会, 日本総合研究所, 1998.
- 5) 大津宏康, 大西有三, 水谷守: 斜面の性能に着目した安定解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.235-243, 1999.
- 6) 大津宏康, 大西有三, 伊藤利和, 竹山雄一郎, 西山哲: 不連続面情報の不確実性に着目した斜面崩壊による社会的損失の推定に関する研究, 土木学会論文集, No.736/III-63, pp. 231-248, 2003.