

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

大津宏康¹・大西有三²・水谷守³・伊藤正純⁴

¹ 正会員 工博 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻 助教授
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

² 正会員 工博 Ph.D 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻 教授
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³ 正会員 工修 正会員 モダンエンジニアリングアンドデザイン
(〒162-0828 東京都新宿区袋町 25-30-207)

⁴ 正会員 工修 パシフィックコンサルタント大阪本社
(〒532-0011 大阪市淀川区西中島 4-3-24)

本研究の目的は、地震に伴う災害リスク評価に基づく斜面補強を戦略的に立案する方法を提案するものである。具体的な事例としては、全国主要都市での高速道路に近接する斜面を対象とし、各地域での地震動特性および、各高速道路の利用状況に応じた被害推定に基づき、コスト次元でのリスク評価を実施した。そして、その算定されたリスクに基づく費用便益解析により、同じ形状の斜面であっても、その補強対策は地震動の地域性および各道路での損害の大きさの相違によって異なることが定量的に表現可能となることを示した。これらの結果より、本研究で提案する手法は、合理的に斜面の補強策を立案する上で極めて有効であることを示した。

Key Words : risk, slope stability, stochastic finite element analysis, cost-benefit-analysis

1. はじめに

急峻な地形からなり平野部の少ない日本の国土では、斜面の安定は、長老からの伝聞に、「海何里、山何里離れて暮らせ」という言葉があるように、古くから身近かな工学的問題であったといえる。すなわち、上記の伝聞に示されるように、台風・地震による斜面崩壊は、津波や洪水と同様に重大な自然災害として認識されてきた。そして、現状でも台風・集中豪雨による土石流・地滑り、地震による斜面崩壊および、急傾斜地での落石事故等は、依然として重大な自然の脅威であると位置付けられる。

このように斜面は一度崩壊すると、重大な被害を引き起こすことが知られており、具体的には、斜面の崩壊に伴う被害とは、住宅地域での人身・家屋に関する被害だけでなく、斜面を含む施設の機能（性能）喪失に関連する。例えば、高速道路や鉄道等に隣接する斜面の崩壊は、事業主には料金収入の停止による損失、一方利用者にはサービスの中断に伴う迂回による損失や営業機会の損失という様々な被害を引き起こす。このため、合理的に斜面の安定性を論じる上では、その機能が斜面崩壊の形態・規模によりどのように損なわれるかを関連づけることが重要となる。したがって、

昨今施設の性能に着目した性能設計（*Performance Based Design*）¹⁾の概念が注目されつつあるように、本来斜面の安定性を考える上では、対象とする斜面の機能（性能）を定義し、その機能が喪失すればどのような損失が生じるかを考慮することが必要である。

一般に、斜面を管理する事業主体者は、高速道路に代表されるように、施設内に多くの斜面を保全しなければならない。その場合には、どの斜面からどの程度の補強工事を実施するかを判定する必要がある。さらに、グラウンドアンカー等による斜面補強を立案することは、機能喪失に伴う損失を抑制するための投資と捉えられるため、最適な斜面補強を実施するためには、いわゆる投資対効果を考慮することが必要となる。特に、これまでの右肩上がりの経済状況での建設投資が潤沢であった時代から、昨今の低成長経済の下で建設投資の妥当性が問われる時代には、投資対効果の議論は極めて重要である。また、このような社会経済学的な要素を考慮した設計の取り組みは、昨今新たなインフラ施設建設の契約方式として注目されつつある PFI（*Private Finance Initiative*）を導入する上で不可欠な要素になるものと推察される。

こうした課題に対処するため、筆者ら^{2), 3)}は高速道路に隣接する斜面の補強対策を対象とし、斜面崩壊

に伴い発生する損失の評価に基づくリスク管理手法を提案してきた。このリスク管理手法での斜面のリスク評価では、リスクを Benjamin and Cornell⁴⁾の研究に代表される信頼性解析手法⁵⁾に準拠し、被害の発生する確率とそれに伴い発生する損失との積で表される損失期待値として定義する。上記の定義の下で算定される斜面の災害リスクは、災害として地震を想定した場合には、地震動の地域性および、斜面の重要度すなわち斜面崩壊に伴う損失の関数として評価される。その結果として、斜面をどのように補強するかという意志決定問題において、従来の安全率を規範とする方法に代わりリスクという指標に基づく検討方法を適用することで、投資対効果を考慮した合理的な対策を立案できる可能性があることを明らかにした。

本研究では、上記の知見を明確にするための応用例として全国主要都市での高速道路に近接する斜面を想定し、各地域での地震動特性および、各高速道路の利用状況に応じた被害推定に基づくリスク評価結果を示すと共に、投資対効果を考慮し斜面の補強策を合理的に立案する方法について示すものとする。

2. 斜面の地震リスク評価の基本概念

本研究では、斜面の補強対策を合理的に立案する一環として斜面の災害リスクの評価を行うが、その検討対象は複数の斜面による特定の地域一帯での災害ではなく、高速道路に近接する個別斜面が引き起こすものとする。また、斜面の補強方法については、グラウンドアンカー工法に限定する。

前述のように、本研究で取り扱うリスクという指標は、次式の通りに定義する。

$$R = P \times L \quad (1)$$

ここに、 R はリスク、 P は斜面の破壊確率、 L は斜面崩壊に伴い発生する損失である。

この定義式に示すように、リスクは破壊に伴う損失の期待値と表現されることになり、これによって破壊に対する危険性と万一破壊した場合の被害規模といったものを合わせて考えることが可能になる。

上記の前提条件の下で、本研究で示す斜面のリスク評価を行う手順は、以下のように要約される。

- 1) 着目する地域における地震動レベル α とその地震動レベルを上回る地震動が発生する確率（年間超過確率）を規定する地震ハザード曲線を設定する。
- 2) 様々な地震動レベル α に対する斜面の条件付き

破壊確率をモンテカルロシミュレーションにより算定する。

- 3) 地震動レベル α に対する年超過確率と条件付き破壊確率の情報を組み合わせることで年間破壊確率を算定する。
- 4) 式(1)に基づき年間破壊確率と斜面崩壊に伴う損失の積として年間リスクを算定する。
- 5) 年間リスクに基づき斜面の耐用年数に相当する累積リスクを算定する。
- 6) 2)～5)の手順を様々なグラウンドアンカーの導入力に対して繰り返す。
- 7) 上記の手順で算定されるに累積リスクに基づき最適な斜面の補強対策（最適アンカー導入力）を決定する。具体的には対策工としてグラウンドアンカーの打設によるリスク低減値が算定されれば、その低減量は対策工を施工することによる便益とみなされるため、いわゆる費用便益分析（Cost-Benefit-Analysis）が可能となる。

上記の1)～7)の検討手順を、地震ハザード情報の異なる地域ごとに実施することで、地震動の地域特性を考慮した最適な斜面の補強対策（最適アンカー導入力）の立案が可能となる。

なお、上記の検討手順については、参考文献3)に詳細を示しているため、ここでは累積リスクの算定方法の概略と、損失の算定方法についてのみ示すものとする。

(1) 斜面の累積リスクの算定

本研究で採用する地震ハザード曲線は、Cornell⁶⁾による提案以来 Der-Kiureghian and Ang⁷⁾等の研究によって改良を加えられたものであり、確率論的地震危険度解析の代表的な方法である。

その基本的な考え方は、地震強度 Y が1年間に少なくとも1回以上 y を越える確率 $P(y)$ を次式のようにポアソン型時系列モデルで表すものである。

$$P(y) = 1 - \exp\left\{-\sum_k w_k(p_0)\right\} \quad (2)$$

ここに、 $w_k(p_0)$ は地震活動域 k の地震で注目地点に $y(p_0)$ 以上の地震動をもたらす地震の年発生率であり、次式のように表される。

$$w_k(p_0) = \nu_k \cdot \sum_i \sum_j P_k(Y \geq y(p_0) | m_i, d_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(d_j) \quad (3)$$

上式で、 ν_k は地震活動域 k における地震の年発生

数である。 $P_k(Y \geq (p_0) | m_i, d_j)$ は k で発生するマグニチュードが m_i 、距離が d_j の地震により Y が $y(p_0)$ を超える確率であり、これが地震動の距離減衰式の確率モデルとなる。また、 $P_k(m_i)$ 、 $P_k(d_j)$ はそれぞれ、地震活動域 k で発生する地震のマグニチュード M 、距離 D の確率関数である。

本研究では、このハザード曲線からある想定地震動を決定するというのではなく、あらゆる地震動の発生を想定した上で斜面災害リスクを評価するという立場をとる。具体的には次式に示すように、ある地震動 α を想定したときの斜面崩壊確率 $p_f(\alpha)$ と、その想定地震動の年発生超過確率 $P(\alpha)$ とを用いて合積することによって、比較的頻繁に発生する小規模な地震から極めて稀にしか発生しない大地震までを、一年当たりにならした形で組み入れる。

$$p_a = \int_0^{\infty} p_f(\alpha) \cdot \frac{dP(\alpha)}{d\alpha} \cdot d\alpha \quad (4)$$

上式に示すように想定地震動ごとに得られる条件付き破壊確率 $p_f(\alpha)$ に、その地震動が一年間に発生する可能性を重みづけした形で合積することにより、年間破壊確率 p_a として求めるものである。

この方法では、従来の設計法での地震動のように具体的な想定地震を考えるわけではなく、小規模な地震から大規模なものまであらゆる地震動に伴い斜面が破壊する可能性を考慮することになる。これは、無数に存在する斜面に対して兵庫県南部地震のような大地震に備えた設計を行うことが経済的に不可能であることを考えると、より効果的な投資を目的とする検討を行う上で有効である。また、このように、斜面の破壊確率として年間破壊確率を用いることで、斜面の耐用年数を考慮することが可能となる。すなわち、供用開始から i 年目に斜面が破壊する可能性を p_i とすると、耐用年数 n 年間での累積リスクは、次式に示すように算定される。

$$R^{(n)} = \sum_{i=1}^n \left\{ p_i \times L \times \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1} \right\} \\ = \sum_{i=1}^n \left\{ p_a (1-p_a)^{i-1} \times L \times \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1} \right\} \quad (5)$$

ここに、 $R^{(n)}$ は供用期間 n 年中の累積リスクで、 p_a は斜面の年間破壊確率、 ρ は社会的割引率、 L は斜面崩壊に伴い発生する損失である。

なお、社会的割引率 ρ は、累積リスクを算定する

際に将来発生するリスクを現在価値に直すための補正率であり、日本では一般に 0.04 に設定される。

(2) 斜面破壊に伴う損失額の評価

本研究では、複数の斜面による地域一帯での損失ではなく、高速道路に近接した個別斜面が引き起こす災害として、以下の損失を考慮するものとする。

- (a) 堆積土砂の撤去および崩壊斜面の復旧費用 L_1
- (b) 道路閉鎖に伴う高速道路の料金収入の減少 L_2
- (c) 迂回にともなう時間・走行費用損失 L_3
- (d) 通行車両および搭乗者に対する損害 L_4

これらの損失額について、これまで筆者らは具体的な算定は行わず、発生する合計損失が崩壊体積に比例するものとしてパラメータスタディを行ってきた。しかし、本検討では以下に示すような方法で具体的に金銭価値の算定をするものとする。

- (a) 堆積土砂の撤去および崩壊斜面の復旧費用 L_1
撤去費用、復旧費用 L_1 は、次式の通り崩壊土砂体積に比例するものとする。

$$L_1 = L_{1,0} \times \frac{V}{V_0} \quad (6)$$

ここに、 $L_{1,0}$ は崩壊土砂基準体積あたりの撤去・復旧費用 (円)、 V_0 は崩壊土砂基準体積 (m^3)、 V は崩壊土砂体積 (m^3) である。

- (b) 道路閉鎖に伴う高速道路料金収入の減少 L_2

本検討では、高速道路の区間をインターチェンジで区切って考え、全ての区間に迂回路が存在すると仮定する。したがって、斜面崩壊時には、崩壊斜面の存在する区間のみが閉鎖されると仮定し、1区間あたりの料金収入額の損失を考えるものとする。この料金収入の減少額は対象区間の日料金収入額と通行止め日数の積で表されるものである。料金収入の減少額を考える場合には、対象とする斜面が存在する区間の区間料金収入を用いることになる。ここでは利用するデータの制約により、1区間を1日閉鎖する場合の損失額を、高速道路全体の日料金収入を区間数で除した額とする。また、通行止め日数は崩壊土砂体積を基にした比例計算により算定する。

$$L_2 = \frac{I}{n_{ic} - 1} \left(n_0 \times \frac{V}{V_0} \right) \quad (7)$$

ここに、 I は一日当たりの総料金収入 (円/日)、 n_{ic}

表一 死傷者一人当たりの人身損失費

	死亡	重傷 (後遺障害)
総務庁資料 (平成5年)	31,533	9,374
(社) 日本損害保険協会 (平成7年度)	29,430	10,390
ドイツ EWS (1997年版)	116,800	10,390
イギリス (COVA1995)	231,000	5,110
アメリカ (1990)	87,800	2,406
オーストラリア (1992)	55,810	7,360
ニュージーランド	240,000	8,400

単位 (千円)

はインターチェンジ数, n_0 は基準通行止め日数, V_0 は基準崩壊土砂体積 (m^3), V は崩壊土砂体積 (m^3) である。

(c) 迂回に伴う時間・走行費用損失 L_3

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、同様に金銭的価値を考える必要がある。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参考資料⁸⁾や太田⁹⁾の研究でまとめられており、その方法を引用するものとする。

これによると、時間費用損失 L_3^t 、走行費用損失 L_3^e は、次式のように表される。

$$L_3^t = n \times \sum_m (A_m \times N_m \times \Delta T) \quad (8)$$

$$\Delta T = \frac{l^L}{u^L} - \frac{l^H}{u^H} \quad (9)$$

$$L_3^e = n \times \sum_m N_m (B_m^L \times l^L - B_m^H \times l^H) \quad (10)$$

ここに、

n : 通行止め日数

A_m : 車種 m の時間価値原単位 (円/台・分)

N_m : 車種 m の日通行台数 (台 (日))

ΔT : 損失時間 (分)

l^L, l^H : 迂回路および高速道路の走行距離 (km)

u^L, u^H : 迂回路および高速道路の走行速度 (km/分)

B_m^L : 車種 m の迂回路における走行費用原単位 (円/台・km)

B_m^H : 車種 m の高速道路における走行費用原単位 (円/台・km)

したがって、迂回損失 L_3 は、次式のように表される。

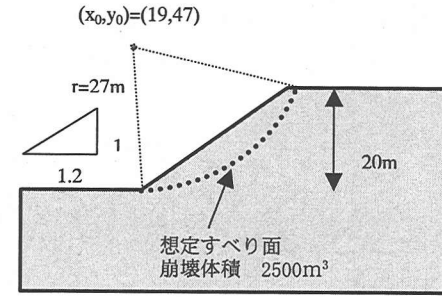
$$L_3 = L_3^t + L_3^e \quad (11)$$

ただし、迂回損失を考える場合には、 NO_x 排出に伴う大気汚染や交通渋滞による迂回地域への騒音被害なども考えられるが、本研究においては、これらの環境費用の算定は行っていない。

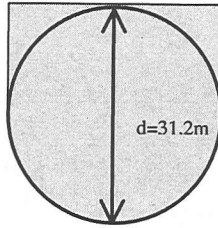
(d) 通行車両および搭乗者に対する損害 L_4

斜面のリスクマネジメントとして、通行車両への損害を算定しなければならないとき、常に中心的な話題として人命の価値が取り上げられる。確かに人命の価値の算定は非常に困難であり、我が国において人命の価値のコンセンサスを得ることは不可能のように思われる。しかし実際に人命の経済的価値を算定する方法はいくつか存在する。例えば、生涯所得を基準とした算定方法、生命保険に基づく方法、裁判事例に基づく方法などである。このような算定方法を自然災害を対象とした場合に直接用いることには問題があるかも知れないが、小林¹⁰⁾が示すように人命の価値を誰が死亡するか分からない場合(事前)に算定するのか、誰かが死亡した後、あるいは誰が死亡するかが分かっている場合(事後)に算定するのかは、全く性格の異なる問題として扱うとするならば議論の対象として考える。すなわち、希少現象として生じる人命の損失について仮想的に議論する際の人命の価値と、人命の損失という具体的・個別的な事実とに直面した場合における人命の価値の問題は全く異質な問題と考えて、その評価方法を追求することには意味がある。後者の具体的・個別的な人命の損失に対する補償の問題は本来司法を通じて議論する課題であり、道路交通の安全性の経済的評価を議論する場合には、前者の立場から人命の価値の算定をすることとなる。

本研究でも、この前者の立場に立って人命の価値の評価を行うこととする。参考資料¹¹⁾によれば交通事故での死傷者一人当たりの人身損失額が表一に示すように設定されている。交通事故であれば、これらの傷害に対してその発生期待値を考えることになるが、本研究のように自然災害を想定するときには死亡の可能性が極めて高いと考え、次のように通行車両への損失額 L_4 を算定する。



(a) 断面図



(b) 仮想崩壊土塊の表面

図-1 斜面モデル図

$$L_4 = n_c \times (L_{4,c} + n_p \times L_{4,p}) \quad (12)$$

ここで、 n_c は被災車両数、 $L_{4,c}$ は1件当たりの物的損失額、 n_p は平均乗車人数、 $L_{4,p}$ は死亡損失額である。したがって、損失 L は以上の4つの損失を足し合わせることで算定される。

3. 解析事例 (斜面の地震時リスク評価)

本章では、地震を外力要因 (ハザード) として発生する斜面災害を考え、その斜面崩壊リスクを評価する事例を示す。モデルとする斜面の形状は、図-1 (a) に示す斜面高 20m、斜面勾配が約 40° (1:2 勾配) とし、円弧型の仮想的すべり面を持つものとする。図-1 (b) は損失額を算定する際に崩壊土砂体積を設定する必要があるため、便宜的に奥行き方向の形状を想定したものである。同図に示すように、奥行き方向の形状を仮定して体積を求めると、崩落土塊の体積は 2,500 m³ となる。

また、材料物性は表-2 に示す通りで、各パラメータを正規確率変数としてモデル化する。

表-2 材料物性値

材料物性	平均値	COV	PDF
弾性係数E	100 MN/m ²	0.1	正規分布
ポアソン比ν	0.3	0.1	
密度γ	23 kN/m ³	0.1	
粘着力c	10 kN/m ²	0.1	
内部摩擦角φ	35°	0.077	

(1) 地震ハザード曲線

石川¹²⁾は、「確率論的地震危険度解析」の拡張問題として「想定地震」の諸元を決定するという試みを行っている。この中で、「確率論的地震危険度解析」に基づく地震ハザード曲線を全国主要8都市 (札幌、仙台、東京、名古屋、大阪、広島、高松、福岡) に対して求めており、それによって発生地震動の特性を基盤加速度とその年発生超過確率の関係として地域ごとに評価している。

本検討では、上記の研究成果の内、4都市 (札幌、仙台、東京、名古屋) での地震ハザード曲線の算定結果を引用する。ただし、この地震ハザード曲線は発生地震の年超過確率を最大基盤加速度 (gal) によって規定しているため、本研究に適用できるように最大基盤加速度から水平震度へ変換することが必要である。このため、本研究では野田ら¹³⁾によって提唱されている評価式を基にして、最大基盤加速度を水平震度に変換する手法を適用する。なお、この評価式を適用するために、表層地盤での地震動の増幅が非常に小さいことを仮定していることに留意する必要がある。

上記の仮定条件の下で、最大基盤加速度 α_{max} と水平震度 k_h の関係は、次式のように表される。

$$k_h = \frac{\alpha_{max}}{g} \quad \alpha_{max} \leq 200 \text{ gal} \quad (13)$$

$$k_h = \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha_{max}}{g} \right)^{1/3} \quad \alpha_{max} \leq 200 \text{ gal}$$

このように、本研究で用いる水平震度 k_h で規定された地震ハザード曲線は図-2 のように設定される。

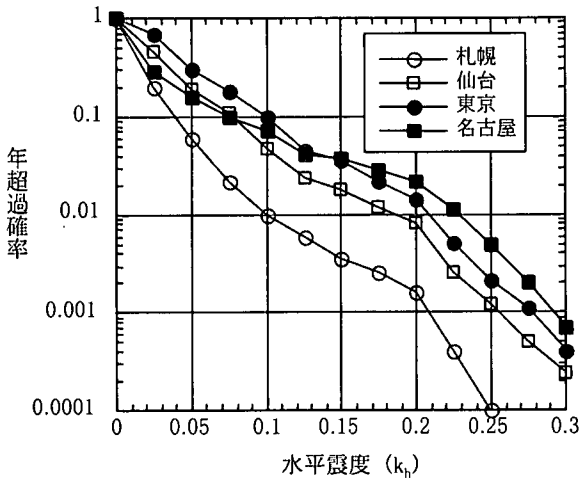


図-2 地震ハザード曲線

(2) 斜面の条件付き破壊確率

本事例での斜面の条件付き破壊確率は、円弧すべり法のような極限平衡理論ではなく、2次元有限要素解析手法を用いたモンテカルロシミュレーションにより算定する。具体的には、斜面の破壊は仮想的なすべり面上の応力値から、モールクーロンの破壊基準を用いて判定するものとし、その方法を以下に説明する。

確率有限要素法¹⁴⁾を用いて、斜面の破壊確率を算定する場合、破壊の判定に用いる性能関数 $\tilde{Q}_s(x_0, y_0)$ はすべり面上に作用する滑動モーメント $M(x_0, y_0)$ とせん断強度による抵抗モーメント $R(x_0, y_0)$ によって、次式で定義される。

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_s(x_0, y_0) &= R(x_0, y_0) - M(x_0, y_0) \\ &= r^2 \int_0^{\theta_0} \tau_{\beta_f} d\theta - r^2 \int_0^{\theta_0} \tau d\theta \\ &= r^2 \int_0^{\theta_0} (\tau_{\beta_f} - \tau) d\theta \\ &= r^2 \int_0^{\theta_0} Q_s d\theta \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、 (x_0, y_0) は図-3に示すようにすべり円の中心座標を表し、 r はすべり円の半径である。また、 Q_s はすべり面上の要素に対する性能関数で次式のように表せる。

$$Q_s = \tau_{\beta_f} - \tau = c_{\beta} + \sigma \cdot \tan \phi_{\beta} - \tau \quad (15)$$

この性能関数は、層理面上でのせん断破壊に対する性能関数として慣用的に良く用いられるものである。したがって、斜面の条件付き破壊確率は、表-2に示

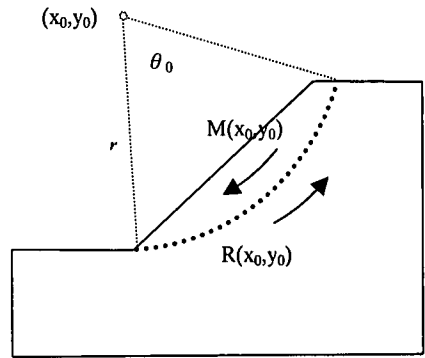


図-3 すべり面上の滑動・抵抗モーメント

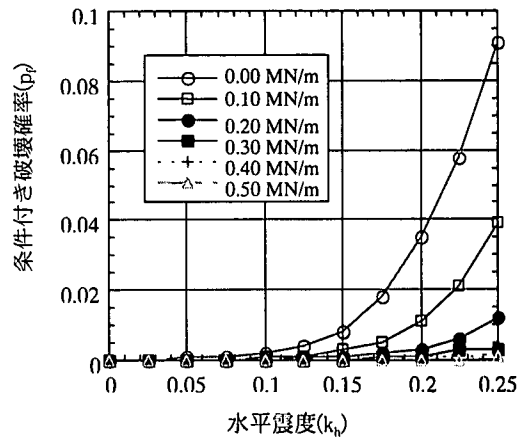


図-4 条件付き破壊確率と水平震度との関係

した強度定数 (c , ϕ) に代表される入力定数を確率変数とし、その各確率変数毎に乱数発生させて式(14)の性能関数を計算し、式(14)が負となる回数を全試行回数で除した値として求まる。

そこで、全試行回数を500回とした条件付き破壊確率の結果を図-4に示す。同図には、対策工としてグラウンドアンカーを導入した場合の条件付き破壊確率も同時に示しており、無対策時の結果はアンカー導入力が0.0MN/mの場合に相当する。

(3) 斜面の年間破壊確率および崩壊時の損失

(2)で求めた破壊確率は、作用する水平震度を固定した状態で求まる条件付き破壊確率であった。しかし、このような地震動の発生自体が不確定事象であり、対象とする地域によってもその性格は異なる。そこで、

表-3 高速道路料金収入の損失額 (L_2)

	札幌	仙台	東京	名古屋
	札幌自動車道	東北自動車道	東名高速道路	名神高速道路
日料金収入 (円)	27,712,000	588,063,000	741,567,000	382,844,000
インターチェンジ数	10	56	31	19
日区間収入 (円)	3,079,000	10,692,000	24,719,000	21,269,000
30日間損失 (円)	92,370,000	320,760,000	741,570,000	638,070,000

表-4 迂回損失 (L_3)

	札幌	仙台	東京	名古屋
	札幌自動車道	東北自動車道	東名高速道路	名神高速道路
日交通量 (台)	55,223	270,572	408,463	249,485
日区間交通量 (台)	6,136	4,919	13,615	13,860
乗用車 (台/日)	5,338 (87%)	3,837 (78%)	10,348 (76%)	10,395 (75%)
普通貨物車 (台/日)	798 (13%)	1,082 (22%)	3,268 (24%)	3,465 (25%)
時間費用損失 (円)	9,860,000	8,244,000	23,025,000	23,545,000
走行時間損失 (円)	934,000	1,311,000	3,557,000	3,470,000
迂回損失合計 (円/日)	10,794,000	9,555,000	26,582,000	27,015,000
30日間損失 (円)	323,820,000	286,650,000	797,460,000	810,450,000

この発生地震動自体の不確定性を考慮するために、(1)で述べた4都市での地震ハザード曲線を用いる。すなわち、条件付き破壊確率から式(4)にしたがって年間破壊確率を算定する。

こうして求めた年間破壊確率を用いて年間リスクを算定する。年間リスクを求めるためには、斜面崩壊に伴う損失額を算定しなければならない。この損失の算定結果を以下に示す。

(a) 撤去・修復費用 L_1

撤去・修復費用 L_1 は、一般的な積算基準より式(6)に $V_0=2,500\text{m}^3$, $L_{1,0}=34,080$ 千円, $V=2,500\text{m}^3$ を代入することで、 $L_1=34,080$ 千円と算定される。なお、 $L_{1,0}$ の内訳は、崩壊体積が $2,500\text{m}^3$ の時の撤去費用4,080千円と簡単な修復費30,000千円とする。

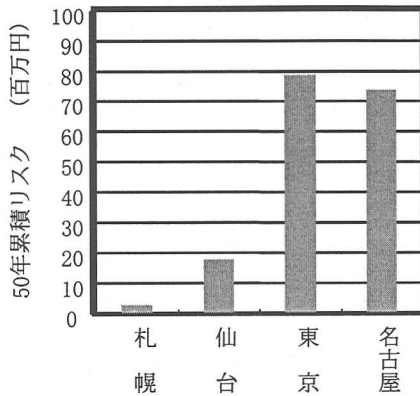
(b) 道路閉鎖に伴う料金収入損失 L_2

道路閉鎖に伴う料金収入損失 L_2 を求めるために、地震ハザード曲線を用いる4都市について、札幌自動

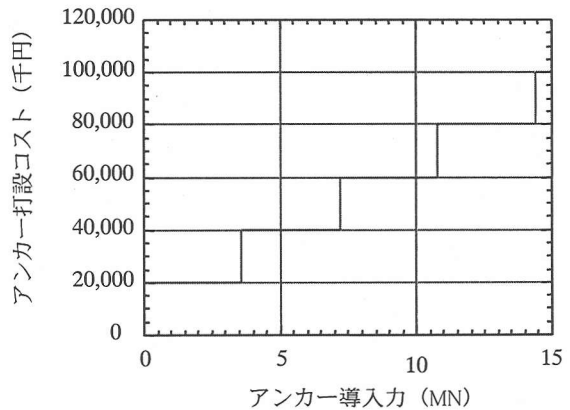
車道(札幌)、東北自動車道(仙台)、東名高速道路(東京)、名神高速道路(名古屋)を想定し、それぞれの都市に対して式(7)に基づき $V_0=2,500\text{m}^3$ の崩壊規模で各道路を $n_0=30$ 日通行止めにする仮定して算定する。その算定結果を表-3に示す。

(c) 迂回に伴う時間・走行費用損失 L_3

迂回に伴う時間・走行費用損失 L_3 は、(b)の道路閉鎖に伴う料金収入損失と同様に、式(8)~式(11)に基づき4都市に対応する地域毎に算定する。その算定結果を表-4に示す。同表に示すように、迂回損失額が最も大きいのは名古屋であるが、これは一区間当たりの平均交通量が他の道路に比べて多く、時間損失が最大になることによる。区間平均距離が長い東京では走行費用損失が最大ではあるが、時間損失額が小さいために、合計した迂回損失額は結果的に名古屋よりも小さくなる。なお、ここでは、迂回路の距離を各高速道路の区間平均距離に5km足した長さとした。



図一5 50年累積リスクの比較（無対策）



図一6 建設コスト（グラウンドアンカー打設費用）

(d) 通行車両および搭乗者への損害 L_4

通行車両および搭乗者への損害 L_4 は、表一1の総務庁資料を用いて算定する。ここで、被災車両数を2台、物的損失額を1件当たり447千円、平均乗車人数を1.5人とすると、

$$L_4 = 2 \times (447,000 + 1.5 \times 31,533,000) \approx 95,493,000$$

と算定される。

(4) 累積リスク

斜面のような土木構造物は供用期間が比較的に長いと考えられるため、一年間当たりのリスクで議論するよりも、耐用年数を考えた累積リスクを採用する方がより現実的である。

そこで、式(5)に基づき累積リスクを算定する。例えば、斜面の耐用年数を50年と想定した時の、無対策での累積リスクは、各都市毎に図一5に示すように算定される。こうして得られた無対策でのリスクを基準値として、最適な斜面補強策を立案することは、グラウンドアンカーによるリスク軽減効果と、そのグラウンドアンカーの打設に伴う建設コストを比較する問題となる。

4. 費用便益分析 (CBA) に基づく最適アンカー導入力の設定

本研究で提案する費用対効果に基づき斜面の補強対策の立案する方法では、便益とは対策工を施すことによって低減されるリスクとみなす。また、費用は本来維持補修までを考えるとときには将来必要な費用とし

て現在価値に直して考える必要があるが、ここでは初期投資となるアンカー打設コストのみを対象とする。したがって、本研究では、3.で示したリスクの算定結果を用いて、アンカーによるリスク低減量とアンカー打設に必要な建設コストに基づき、最適解を求めるための費用便益分析を行う。

(1) グラウンドアンカーの建設コスト

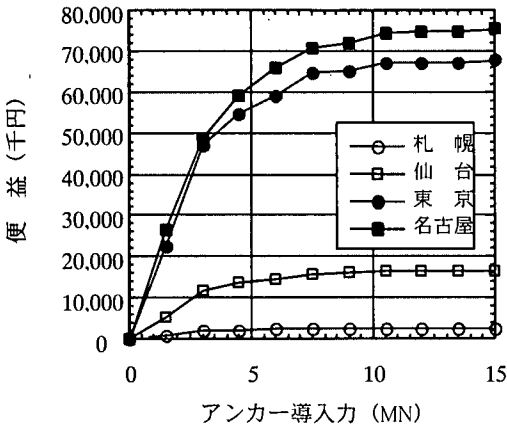
図一4に示した条件付き破壊確率結果は、2次元FEMを用いたモンテカルロシミュレーションした結果であるので導入力の単位は、単位奥行き当たりとしてMN/mで表している。これに対して、累積リスクは図一1(b)に示すような便宜的な形状を考えて3mピッチでアンカーを奥行き方向に10本打つとしたため、単位も奥行き30mを考慮した値として示している。したがって、図一1(a)に相当する図としてアンカー導入力の大きさと建設コストの関係を求める必要がある。

そこで、グラウンドアンカー一本あたりの許容引張力を次式により算定する。

$$\begin{aligned} T_{ag} &= \frac{1}{f_s} T_{ug} \\ &= \frac{1}{f_s} \pi \cdot d_a \cdot l_a \cdot \tau \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 T_{ag} は許容引張力、 T_{ug} は極限引張力、 d_a は掘削径、 l_a はアンカー一定長、 τ は周面摩擦抵抗である。

式(16)に基づき、ある必要アンカー導入力に対して、何本(何段)のアンカーが必要になるかを算定し、そのアンカー打設コストを計算する。



図一七 導入力と50年間で得られる便益の関係

ここでは、一般的なアンカーの設計値として各値を次のように設定する。すなわち、周面摩擦抵抗 τ は 5×10^2 kN/m²、掘削径 d_a は0.115m、アンカー定着長 l_a は5.0mおよび、安全率は2.5とする。

この結果、アンカー一本当たりの許容引張力は 3.61×10^2 kNとなるため、1段当たり10本で最大3.61MNまでの導入力が得られることになる。

また、この寸法での1本当たりのアンカー打設コストは通常約2,000千円と試算されるので、アンカー1段当たりの建設コストは20,00万千円とする。

このようにして、アンカー導入力と建設コストの関係は、図一六に示すように求められる。

(2) 費用便益分析

まず、 n 年間で得られる便益を現在価値に換算したものは次式より求まる。

$$\begin{aligned}
 B^{(n)}(T) &= \sum_{i=1}^n \left\{ R_i(T=0) - R_i(T) \right\} \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1} \\
 &= \sum_{i=1}^n R_i(T=0) \cdot \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1} - \sum_{i=1}^n R_i(T) \cdot \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^{i-1}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

ここに、 $B^{(n)}(T)$ はアンカー導入力を T (MN)とすることによって n 年間で得られる便益の現在価値、 $R_i(T=0)$ は現状で発生する n 年後のリスク、 $R_i(T)$ はアンカー導入力を T としたときに発生する n 年後のリスク、 ρ は社会的割引率を表す。

なお、式(17)の右辺は、式(5)でアンカー導入力をそれぞれ0および T としたものである。よって、50年間で得られる便益の現在価値は、図一七に示すようにアンカー導入力の関数として求められる。

また、 n 年間に発生する費用を現在価値に換算したものの $C^{(n)}(T)$ も考える必要があるが、実際には初期投資だけを考えるため、図一六に示したアンカー打設コストを直接用いることができる。

以上の定義の下で、図一六および図一七から費用便益分析で考えられる次の2つの基準が算定される。

1) 純現在価値に基づく費用便益差 (NPV)

$$NPV(T) = B^{(n)}(T) - C^{(n)}(T) \tag{18}$$

2) 費用便益比 (CBR)

$$CBR(T) = B^{(n)}(T) / C^{(n)}(T) \tag{19}$$

図一八および図一九に、費用便益差(以下NPVと称する)および費用便益比(以下CBRと称する)の算定結果をそれぞれ示す。本検討のように単一プロジェクトを対象とすると、両者は、本質的には同じ情報を与える。つまり、次のような関係が成り立つ。

$$NPV(T) \geq 0 \Leftrightarrow CBR(T) \geq 1 \tag{20}$$

ただし、複数のプロジェクトを比較する場合にはCBRが小さくてもNPVは大きくなる場合がある。つまり、大規模プロジェクトであれば収益率が小さくても(CBRが小)、収益額が大きく(NPVが大)なる場合がある。

図一八に示す結果を見ると、東京および名古屋では、アンカー導入力が3MNのときにNPVが正の最大値をとるが、それ以外の道路ではNPVが常に負となるため投資の効果が乏しいという結果となる。さらに、図一九に示す結果を合わせて考えると、東京および名古屋において投資効果が最も優れていると考えられるのは、CBRが最も大きいアンカー導入力が3MNの場合であることが分かる。したがって、いずれの指標を見てもアンカー導入力は3MNとすることが望ましいことになる。そして、それ以外の道路ではグラウンドアンカーを施す必要がないことになる。

このように、最適アンカー導入力は、地域によって異なる値となる。つまり、同じ形状の斜面であっても、その補強対策は地震動の地域性および各道路での損害の大きさの相違によって異なることが、定量的に表現可能となる。

筆者らは、これまでに斜面補強対策としての最適なグラウンドアンカーの導入力を定めるための方法として、総コスト最小化の原理を用いてきた。以下に、その方法とここに示す費用便益を用いた方法との関連について考察を加える。

ここで、総コストをアンカー導入力 T の関数として $TC(T)$ 、その時のアンカー打設コストを $C_{init}(T)$ 、リスクを $R(T)$ とすると、総コストは次式のように定義される。

$$TC(T) = C_{init}(T) + R(T) \quad (21)$$

この場合では、 $R(T)$ は式 (5) の $R^{(n)}$ に相当する。

次に、式 (21) は式 (18) を用いて次式のように変形される。

$$\begin{aligned} TC(T) &= C_{init}(T) + R(T) \\ &= C_{init}(T) + \{R^{(n)}(T=0) - B^{(n)}(T)\} \\ &= R^{(n)}(T=0) - \{B^{(n)}(T) - C_{init}(T)\} \\ &= R^{(n)}(T=0) - NPV \end{aligned} \quad (22)$$

したがって、式 (22) に示すように、総コストが最小となるアンカー導入力 T は、費用便益差が最大となる値に一致する。

5. まとめ

本研究では、自然災害の中でも特に地震をハザードとして起こる斜面災害に着目し、全国主要都市での高速道路に近接する斜面でのリスク評価結果を示すと共に、投資対効果を考慮し斜面の補強策を合理的に立案する方法について示した。この手法の特徴は、検討の対象とする各地域での地震活動度および、道路の利用状況に基づく損益を定量的に評価することであり、また補強対策の効果を費用便益解析により判定することである。

この結果として、補強対策を実施するか否かの判定を行った結果として、地震動の地域性および各道路での損害の大きさによって、同じ形状の斜面でも異なる最適アンカー導入力が得られることを明らかにした。

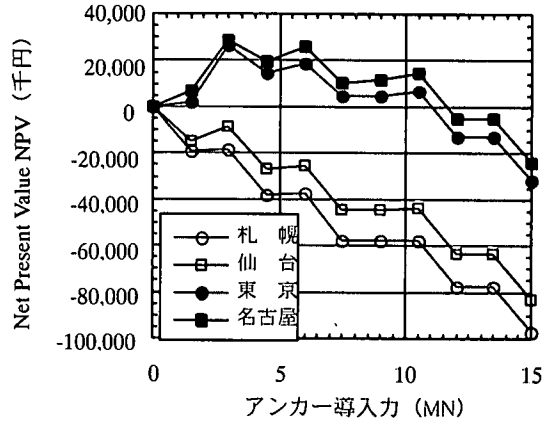


図-8 斜面の純現在価値 (NPV)

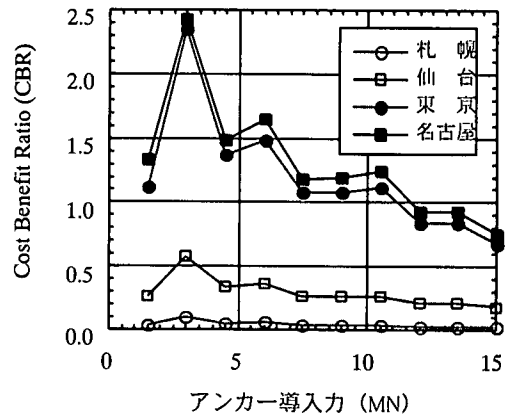


図-9 斜面の費用便益比 (CBR)

また、従来リスク評価結果に基づく判定基準として総コスト最小化原理を適用することは、この補強対策の問題では費用便益差を最大にすることと等価であることを明らかにした。

ただし、本研究で示した、検討の対象とする各地域の高速道路での斜面崩壊に伴い発生する損失の算定結果は、多くの仮定に基づくものである。このため、今後は、実際の事例を用いて損失の評価の妥当性について検討を行う所存である。さらに、損失自体の不確実性をも考慮することで、例えば *VaR* (*Value at Risk*) の概念を用いて、より多様なリスク評価についても検討を加える所存である。

参考文献

- 1) 藤谷秀雄：性能を基盤とした新構造設計体系，土木学会誌，vol.83-1，pp.36-39，1998。
- 2) 大津宏康，大西有三，水谷守：高速道路に近接する斜面

- を対象とした自然災害に対するリスクマネジメント手法に関する提案, 土木学会論文集, No. 658/VI-48, pp. 245-254, 2000.
- 3) 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手法に関する一考察, 土木学会論文集, No. 631/III-48, pp. 235-243, 1999.
 - 4) Benjamin, J. R. and Cornell, A. A.: Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill, pp. 578-580, 1970.
 - 5) 松尾稔: 地盤工学-信頼性設計の理念と実際-, 技報堂出版, pp. 60-64, 1984.
 - 6) Cornell, C.A.: Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
 - 7) Der-Kiureghian, A. and Ang, A.H.S.: A Fault Rupture Model for Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.67, No.4, pp.1173-1194, 1977.
 - 8) 道路投資の評価に関する指針検討委員会: 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.
 - 9) 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.
 - 10) 小林潔司: 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.212-235, 1997.
 - 11) 道路投資の評価に関する指針検討委員会: 道路投資の評価に関する指針(案), 日本総合研究所, pp.59-71, 1998.
 - 12) 石川裕: 確率論的想定地震と低頻度巨大外力評価へ応用に関する研究, 京都大学大学院博士論文, 1998.
 - 13) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹: 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, Vol.144, pp.67-111, 1975.
 - 14) 鈴木誠, 石井清: 確率有限要素法による斜面安定解析, 土木学会論文報告集, No.364, pp.199-208, 1985.

(2000.7.26 受付)

THE PROPOSAL OF THE METHODOLOGY ASSOCIATED WITH DECISION-MAKING OF REINFORCEMENT OF SLOPES BASED ON COST-BENEFIT-ANALYSIS

Hiroyasu OHTSU, Yuzo OHNISHI, Mamoru MIZUTANI and Masazumi ITOU

This paper presents the methodology related to Decision-Making of Reinforcement of Slopes Based on Cost-Benefit-Analysis. As for an example to show the applicability of the proposed method, the slopes closed to highway, which are located at four major cities in Japan, were focused on. In detail, by considering the locality of seismic activity and losses due to slope failure quantitatively, risk was evaluated. Furthermore, by regarding the amount of risk mitigation by means of the installation of ground anchor as the benefit, cost-benefit-analysis was carried out to obtain the optimum counter-measures. The results showed that the proposed method has great possibility to determine the reinforcement of slope rationally.