

斜面の性能に着目した安定解析法に関する一考察

大津 宏康¹・大西 有三²・水谷 守³

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

(現在 Associate Professor, Asian Institute of Technology, Geotechnical Engineering Program)

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

³正会員 工修 (株) 篠塚研究所 主席研究員 (〒160-0022 東京都新宿区新宿6-26-4)

従来より、斜面の安定解析では、その安定性の評価には安全率を規範とする手法が適用されてきた。しかし、この安全率を規範とした設計法の問題点は、斜面の耐用年数及びコストを規範とした斜面の重要度について、明確には評価していないことである。本研究では、このような課題を解決する方法として、従来の安全率規範に代わり、機能設計の概念に基づき斜面の耐用年数・重要度を明確に評価するため、コスト次元で表現したリスクを規範とした、斜面の設計法について提案するものである。

Key Words: slope stability, stochastic approach, performance based design, seismic hazard, ground anchor

1. はじめに

従来より、土質及び岩盤斜面の安定性を評価する手法としては、主としてすべり破壊に対する直線すべり法・円弧すべり法に代表される極限平衡理論が用いられ、その安定性を評価する指標として安全率が用いられてきた。一般に、極限平衡理論を用いて斜面の安定性を評価する場合に、安全率はすべり抵抗力とすべり力との比として定義される。いうまでもなく、すべり抵抗力はすべり面に対するせん断強度(c , ϕ)の関数として定義され、一方すべり力はすべり面形状に対して単位体積重量 γ で算定される自重及び地震に伴う慣性力等の関数として定義される。

これらの安定性評価に関わるパラメータの中で、強度定数に代表されるように地盤材料に関わるパラメータはばらつきに起因する不確実性を有することが知られている。また、斜面の設計を行う場合、すべり力となる地震動に起因する慣性力が支配的因子となることが多いが、対象とする斜面が属する地域の地震動特性についても不確実性を有する。

このため、厳密な意味では、算定すべきすべり抵抗力・すべり力自体がばらつきを持つため、それに伴い安全率について一意的にその値を設定できないことになる。これに対して、斜面の安定解析については上述のような検討課題を含んでいるにも関わら

ず、依然として一般的には以下のような斜面の設計手法が適用されている。すなわち、地盤定数のばらつきを認めた上で、すべり抵抗力としては平均値に対して小さめの値を、一方すべり力としては大きめの値が適用されるため、上述の地盤定数のばらつきが斜面の安定性に及ぼす影響を、明確な形で安全率に反映されることは稀である。そして、設定地震動及び経済性については、いずれの示方書においても、一般的に斜面の安全率は、地域性及び重要度に応じてというあいまいな表現の下で、許容安全率として1.2~1.5に設定されることが多い。

上記の課題の内、地盤定数の不確実性について対処する方法として、松尾¹⁾の研究に代表されるように、地盤定数を確率変数としてモデル化することで、そのばらつきに起因する不確実性を考慮し、さらに斜面の安定性を表す指標として安全率に代わり、破壊確率を用いる方法が地盤構造物に対する信頼性解析手法として提案されてきた。

また、設定すべき地震動の不確実性について対処する一方策として、例えば、兵庫県南部地震後の道路橋下部構造の設計に関する復旧対策では、構造物の重要度に応じてそれぞれ100年確率及び1000年の発生確率に相当する地震動(レベル1・レベル2地震)を設定することが規定された。さらに、このような地震動の発生確率を規定するための根拠を明確にする方法として、Annaka et al.²⁾、石川³⁾の研

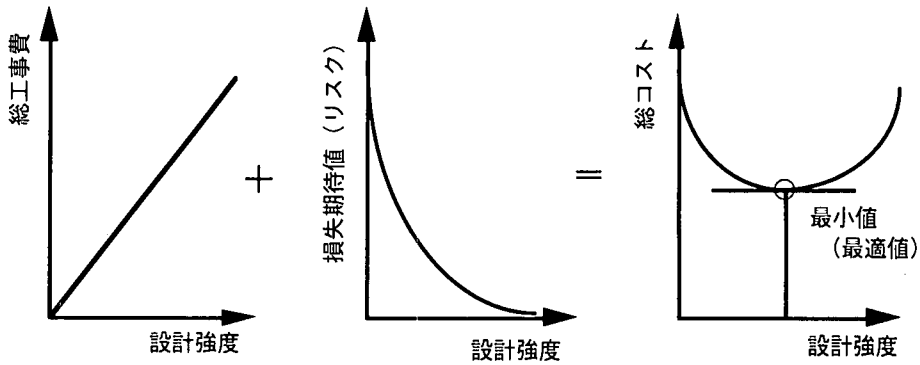


図-1 総コスト最小化の原理

究に代表されるように、地震の発生を過去の地震履歴に基づきモデル化し、その地域毎での地震動の発生を、地震ハザード曲線を用いて表現する方法も提案されている。

一方、近年建築構造の設計では、構造物の機能に主眼を置いた性能設計⁴⁾の概念が提案されてきた。この性能設計の概念に、従来の斜面の設計を照らし合せた場合に、以下のような問題点をあげることができる。すなわち、従来の安全率を規準とした設計方法では、斜面の耐用年数及びその重要度について、明確には評価されていないことが明らかとなる。もちろん、現状の設計でも、仮設斜面と永久斜面のように耐用年数が異なる場合及び、あるいは高速道路の切り取り斜面と一般道の切り取り斜面のように用途あるいは重要度が異なる場合には、設計時に設定される許容安全率が異なるのが一般的である。ただし、ここで指摘する問題は、その許容安全率の設定が、性能設計で明示されるような明確な根拠に基づくものではないことである。

したがって、本検討では斜面の設計を合理的に行う一手法として、上述の性能設計の概念を適用するものとする。ここで、斜面の目標性能とは、それぞれの斜面の持つ重要度および、その斜面の耐用年数に関連して規定されるものと定義する。すなわち、斜面の形態（自然斜面・切り取り斜面・盛土斜面）に係わらず、その斜面が存在することの効用は規定される。前述のように、高速道路に附随する斜面および、一般道路に附随する斜面では、それぞれの斜面の持つ効用は異なるはずである。また、斜面が住宅密集地に近接しているか否かによっても、その効用は本来異なるはずである。さらに、従来の設計手法では、明確には評価されない、斜面の耐用年数も斜面の性能を評価する上では、重要な要因である。

次に、斜面の目標性能を明示するための指標とし

て、図-1の模式図に示す総コスト最小化の概念を適用する。同図に示すように、総コスト最小化の概念は、設計強度に対する施工費とその設計強度に対する損失期待値（リスク）を重ね合わせることで、総コストと設計強度の関係を算定し、その最小値を最適設計強度として設定するものである。

なお、本来図-1(a)に示す設計強度と施工費の関係は線形ではないが、同図では議論を簡単にするために線形関係を仮定する。

このような観点から、本検討では、斜面の目標性能としてその重要度及び耐用年数を想定し、これらの要因を定量的に考慮した設計法を提案する。

2. 斜面の安定性評価手法

本検討では、斜面の安定性を評価する上での外力の支配的要因として地震力を想定し、検討手法としては、Mizutani⁵⁾の提唱する地震リスクマネジメント手法（SRM）を斜面の安定解析に援用するものとする。なお、ここで提案する設計法の適用事例としては、議論を簡素化するために極限平衡理論に基づく平面すべりを想定し、その対策工としてグラウンドアンカーを適用する。このため、本検討では、図-1に示す横軸の設計強度は、グラウンドアンカーの導入力に相当する。以下に、ここに提案する設計手法を要約して示す。

(1) 耐用年数を考慮した破壊確率の算定

地盤定数の不確実性を考慮するため、松尾の研究と同様に、斜面の安定性を規定する性能関数に含まれる地盤定数を確率変数として取扱い、その安定性を判定する指標として破壊確率を用いる。

具体的には、斜面の安定解析に係わる地盤定数を確率変数としてモデル化し、安定性を評価する性能

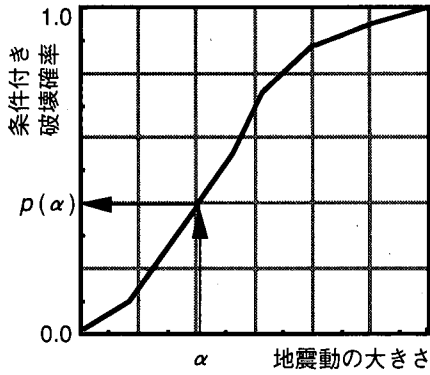


図-2 斜面の地震時脆弱性曲線 (模式図)

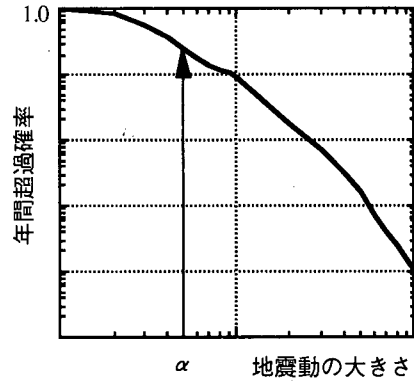


図-3 地震ハザード曲線 (模式図)

関数に基づき、モンテカルロ法あるいは一次近似二次モーメント法により、ある地震動レベル α に対する条件付き破壊確率 $p(\alpha)$ を算定する。この手順を様々な地震動レベルに対して繰り返すことで、図-2に示す斜面の地震時脆弱性曲線を定義する。なお、上記の過程を、所定のアンカー導入力毎に繰り返すことで、所定のアンカー導入力に対する斜面の地震時脆弱性曲線を算定する。

次に、耐用年数を考慮するための方法としては、地震の発生を確率事象と仮定し、あるレベルの地震動 α とそれを1年当たりを超す地震動の発生する確率 (年超過確率) の関係を規定する、図-3に示す地震ハザード曲線を適用する。そして、次式に示すように、地震時脆弱性関数と地震ハザード情報を合積して、地震の発生確率を考慮した指標となる年間破壊確率 p を算定する。

$$p = \int_0^{\infty} p(\alpha) P(\alpha) d\alpha \quad (1)$$

また、式 (1) より求められる年間破壊確率 p に基づき斜面の耐用年数を考慮するため、経過年数 n に対する破壊確率 p_n を、次式のように定義する。

$$\begin{aligned} p_1 &= p \\ p_2 &= p(1-p) \\ p_3 &= p(1-p)^2 \\ &\vdots \\ p_n &= p(1-p)^{n-1} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 n は経過年数を表す。

(2) 耐用年数を考慮した条件付きリスクの算定

斜面の重要度については、その斜面が破壊することに伴う損失をコスト次元で評価するものと仮定する。この仮定の下で、図-1 (b) に示す損失期待値 (リスク) を、Benjamin and Cornell⁶⁾ の研究に代表される古典的信頼性解析手法に準拠し、次式に示す条件付き期待値として定義する。

$$R = P \times C \quad (3)$$

ここで、 R はリスクを、 P はあるグラウンドアンカーの導入力を作用させた場合の破壊確率を表す。また、 C はその斜面の破壊に伴い発生する損失 (コンシーケンス) を表す。さらに、損失 C (コンシーケンス) は、次式のように定義する。

$$C = C_1 + C_2 \quad (4)$$

ここで、 C_1 は斜面破壊による直接的な損失を表し、一般的には斜面崩壊による土塊の撤去費に相当する。

また、 C_2 は本来その斜面の有する効用 (Utility) すなわち斜面の重要度と関連づけられる項であり、その斜面が崩壊することにより失なわれる効用を損失と捉えて、具体的には営業損失、周辺経済に及ぼす損失等に相当する。したがって、この項は、斜面が崩壊した場合に、土塊を撤去し復旧するまでの効用すなわち営業損失に相当すると考えられる。

(3) 累積リスクおよび最適アンカー導入力の査定

(1)、(2) に示す算定過程を、所定のアン

表-1 地盤パラメータ

パラメータ	中央値	変動係数
粘着力 c	10kN/m ²	0.1
内部摩擦角 ϕ	35.0°	0.077

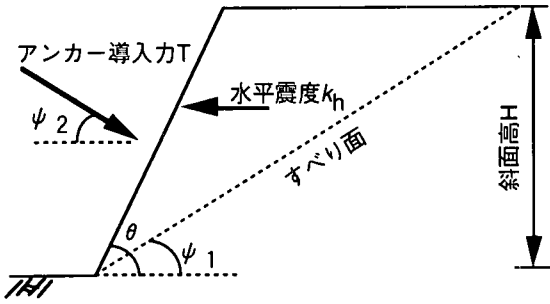


図-4 解析対象斜面 (平面すべりモデル)

カー導入力毎に繰り返すことにより、所定のアンカー導入力に対する、経過年数の関数となる斜面の累積リスクを算定する。さらに、所定のアンカー導入力に対する工事費 (初期投資) と累積リスクを重ね合わせるにより、総コストの経時変化が次式のように算定される。

$$TC(n) = C(T) + \sum_{i=1}^n p_i \times C \quad (5)$$

ここで、 $TC(n)$ は経過年数 n に対する総コストを、 $C(T)$ はある導入力 T でグラウンドアンカーを打設する場合のコストを表す。

したがって、式 (5) に示す総コストの定義式で、右辺第一項が図-1 (a) の工事費に、右辺第二項が図-1 (b) の損失期待値 (リスク) に相当する。また、右辺第二項のリスクの評価式は、本質的には式 (1) に準ずるものであるが、ここでの破壊確率としては、地震動を規定した破壊確率ではなく、地震ハザード情報を考慮した年間破壊確率を適用していることに留意する必要がある。

式 (5) で算定された総コストの経時変化に対して、所定の耐用年数を設定することで、図-1 (c) に対応する総コスト最小化の概念に基づき、最適アンカー導入力 が設定される。

なお、一般に斜面の長期安定性を考える場合には、斜面の風化およびグラウンドアンカーの耐久性を考慮する必要がある。また、これらの項目は、斜面の累積破壊確率に影響を及ぼすものと考えられる。ただし、本検討では、これらの項目については今後の検討課題として、考慮しないものと仮定とする。

3. 解析事例及び考察

ここでは、2. に示した設計法の適用事例として、議論を簡素化するために、図-4 に示す極限平

衡理論に基づく平面すべりを想定する。また、斜面安定のための対策工としては、グラウンドアンカーの適用を想定し、その地域の地震動特性、耐用年数及びその斜面の重要度に応じた、最適アンカー導入力の設定方法について示す。

(1) 解析条件

この検討で用いる図-4 に示すような斜面形状での平面すべり問題を想定した場合、すべり抵抗力 R 及びすべり力 S は、次式のように表される。

$$R = W(\cos \varphi_1 - k_h \sin \varphi_1) \tan \phi + \frac{H}{\sin \varphi_1} c + T \cos (\varphi_1 + \varphi_2) \quad (6)$$

$$S = W(\sin \varphi_1 + k_h \cos \varphi_1) \quad (7)$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left(\frac{1}{\tan \varphi_1} - \frac{1}{\tan \theta} \right) \quad (8)$$

ここで、 W はすべり土塊の自重、 γ は単位体積重量、 k_h は水平震度、 H は斜面高、 θ は斜面傾斜角、 φ_1 はすべり面角度及び、 φ_2 はグラウンドアンカー打設角を表す。

したがって、性能関数 f は次式となる。

$$f = R - S = W(\cos \varphi_1 - k_h \sin \varphi_1) \tan \phi + \frac{H}{\sin \varphi_1} c + T \cos (\varphi_1 + \varphi_2) - W(\sin \varphi_1 + k_h \cos \varphi_1) \quad (9)$$

式 (9) 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 に示すような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 $\varphi_1 = 30^\circ$ 、グラウンドアンカー打設角 $\varphi_2 = 30^\circ$ の確定値とする。

以上の条件の下で、一次近似二次モーメント法により、ある地震動レベル k_h 及びグラウンドアンカー導

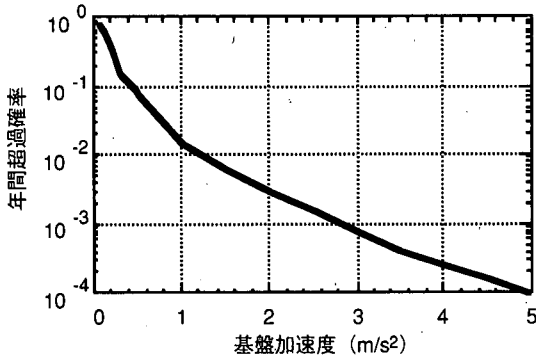


図-5 地震ハザード曲線 (基盤加速度)

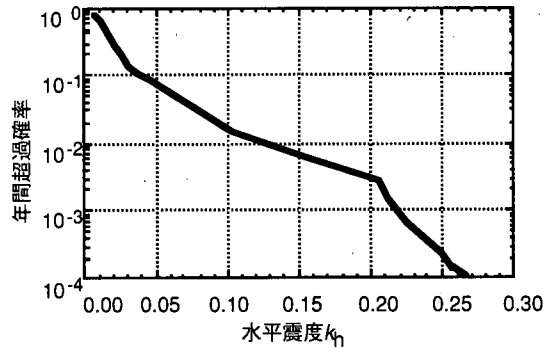


図-6 地震ハザード曲線 (水平震度)

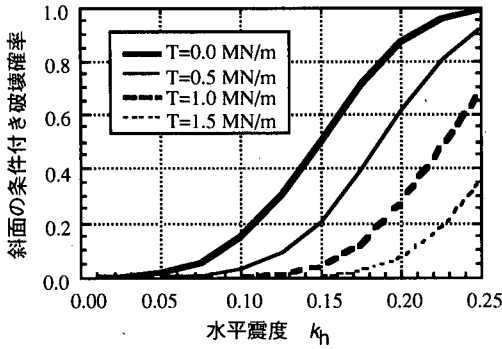


図-7 地震時脆弱性曲線

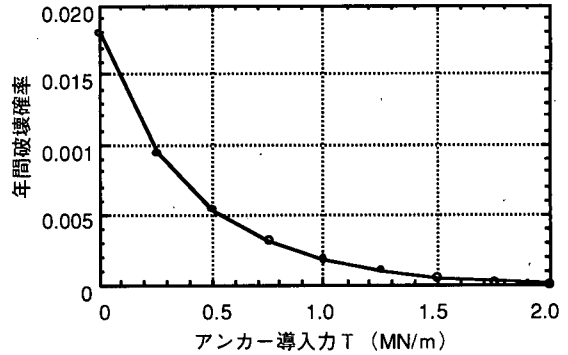


図-8 年間破壊確率とアンカー導入力の関係

入力 T に対する条件付き破壊確率 $p(k_h, T)$ を算定する。

次に、地震ハザード情報については、図-5 に示す Uzawa et al.⁷⁾ に報告されている地震ハザード曲線を適用する。ただし、同図に示す関係では、地震動レベルが基盤加速度で与えられているので、野田ら⁸⁾ により提唱されている評価式を基にし、次式のように基盤加速度と水平震度の関係式を仮定する。

$$\begin{aligned} k_h &= \frac{\alpha_{\max}}{g} & \alpha_{\max} &\leq 2.0 \text{ m/s}^2 \\ k_h &= \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha_{\max}}{g} \right)^{1/3} & \alpha_{\max} &\geq 2.0 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

この結果として、図-6 に示すような地震動レベルを水平震度 k_h で規定した地震ハザード曲線が得られる。そして、図-6 に示す地震動レベルを水平震度 k_h で規定した地震ハザード曲線を用いて、式 (1) 及び式 (2) に示す関係式に基づき、各グラ

ンドアンカー導入力毎のある経過年数 n に対する破壊確率 $p_n(T)$ を算定する。

さらに、上記の手順により求められたある経過年数 n に対する破壊確率 $p_n(T)$ に対して、式 (3) に基づきリスクを算定する。

(2) 総コストの算定条件

本検討では、式 (5) に示す総コスト算定のための条件は、以下のように設定する。

- 式 (1) に示すリスク算定式でのコンシーケンス C の内、斜面崩壊に伴う撤去費に相当する直接損失 C_1 を基本コストとする。すなわち、その具体的なコストとしては、 1m^3 当たりの撤去費を基本単位 U と設定する。
- 斜面の効用に相当する間接的な損失 C_2 は、前述のように、土塊を撤去し復旧するまでの効用すなわち営業損失に相当する。このため、個々の斜面の営業収益に基づき固有の値を算定すべきであるが、ここでは議論を簡素化するために、 aU と基本単位の関数と仮定

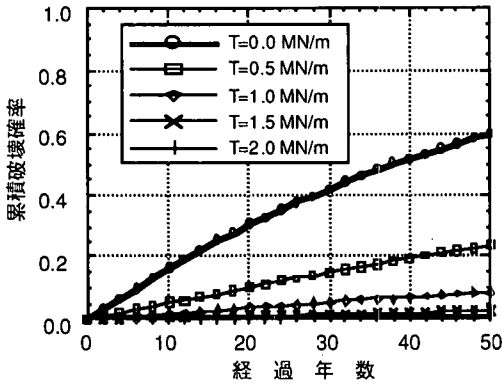


図-9 累積破壊確率

し、 a を重要度を表すパラメータと定義する。

- 3) 初期投資に相当するグラウンドアンカーの打設に伴うコストは、グラウンドアンカー導入力毎に変動する。このため、本検討では、グラウンドアンカーを打設するためのコストを、導入力 0.01MN/m (約 1tf/m) 当たり $10U$ と仮定する。

(3) 解析結果及び考察

(1), (2)の手順に基づく斜面の破壊確率及び総コストの算定結果について、以下に要約して示す。

a) 累積破壊確率の算定

図-7は、(1)に示す条件の下で算定した、アンカー導入力をパラメータとした斜面の地震時脆弱性曲線を表す。なお、同図に示す各脆弱性曲線の内、導入力 $T=0$ はグラウンドアンカーを打設しない場合(無対策)を意味する。この結果に示すように、斜面の条件付き破壊確率は $p(a)$ は、地震動レベルが高くなるに連れて大きくなり、そして同じ地震動レベルでも、対策工となるアンカー導入力が増加するにつれて減少する傾向を示す。

次に、式(3)に示すように、この脆弱性曲線と図-6に示す地震ハザード情報を合積して算定される、年間破壊確率 p を図-8に示す。同図に示すように、年間破壊確率 p は、図-7の脆弱性曲線に示した条件付き破壊確率に比べて小さくなる。これは、図-8に示す年間破壊確率 p が、図-7の脆弱性曲線に示す破壊確率に対して、対象地域でのあるレベルの地震動の発生を確率過程(具体的にはポアソン過程)によりモデル化し、年当たりの破壊の発生確率に変換していることによるものである。その

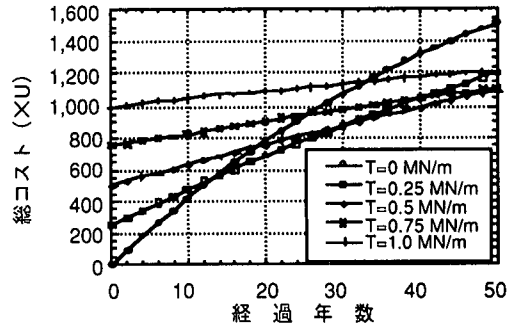


図-10 総コストの推移 ($a=10$)

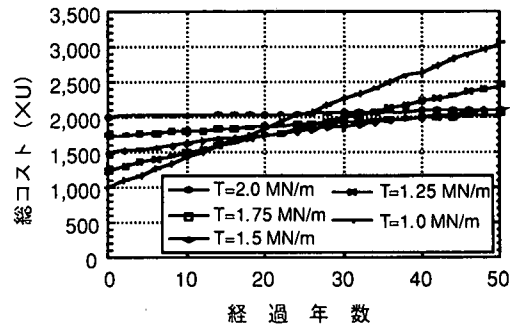


図-11 総コストの推移 ($a=100$)

結果として、無対策($T=0\text{MN/m}$)でも年間破壊確率 p は 0.018 と小さな値となる。そして、アンカー導入力として 2MN/m を作用させた場合の年間破壊確率 p はほぼ 0 に近い値となる。

次に、各アンカー導入力毎での、式(5)の第二項でコンシーケンス(損失)の係数となる、累積破壊確率を式(4)に基づき算定した結果を図-9に示す。同図に示すように、累積破壊確率は、経過年数とともに増加する傾向を示し、無対策($T=0\text{MN/m}$)の場合で、経過年数30年で 0.4 及び経過年数50年で 0.6 程度となる。また、アンカー導入力が $1.5\sim 2.0\text{MN/m}$ の場合には、その累積破壊確率は、条件付き確率自体が小さいため、経過年数が50年でもその値は微少である。

b) 総コストの算定

ここでは、a)に算定方法を示した破壊確率及び式(5)に基づき、総コストの算定結果について示す。

その一例として、構造物の重要度を表すパラメータ a を $10, 100$ とした場合の総コストの経年変化を、それぞれ図-10及び図-11に示す。例えば、図-10に示す $a=10$ の場合には、図-9の累

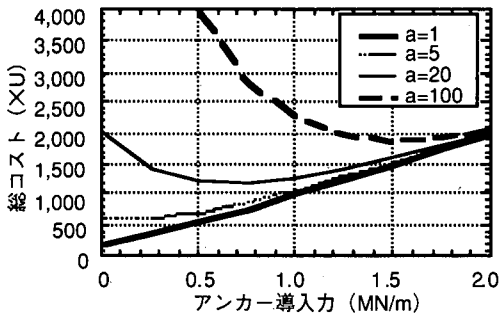


図-1 2 総コストとアンカー導入力の関係 (耐用年数30年)

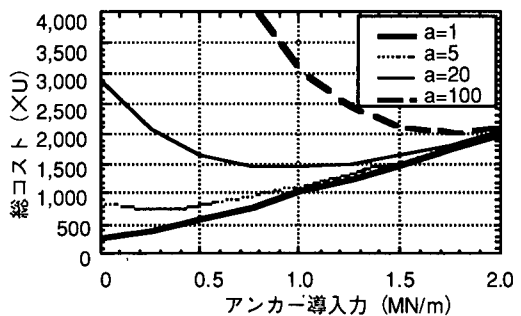


図-1 3 総コストとアンカー導入力の関係 (耐用年数50年)

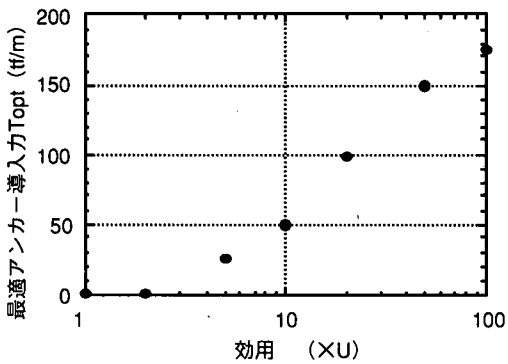


図-1 4 効用と最適アンカー導入力の関係

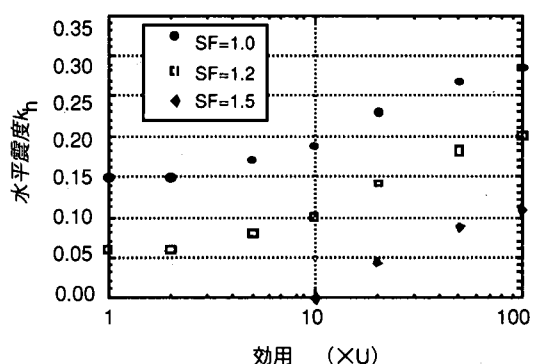


図-1 5 設定水平震度と効用との関係

積破壊確率の推移に示すように、アンカー導入力がいささか小さい程、経過年数に伴う総コストが増加する傾きが大きくなる。しかし、初期投資に相当するグラウンドアンカーの打設費により、例えば斜面の耐用年数を10年程度と設定した場合には、リスクを含めた総コストは無対策の場合が最小値となる。一方、斜面の耐用年数を長く設定するにつれて、初期投資が増加するにも係わらず、アンカー導入力が増加するにつれて累積リスクの増加が小さくなるため、グラウンドアンカーを打設した場合の方が総コストが小さくなる。

この傾向は、図-1 1 に示す斜面の重要度がより高い $a=100$ の場合により顕著である。すなわち、構造物の重要度が高くなる(係数 a が大きくなることと等価)につれて、グラウンドアンカーに起因する初期投資が増加するにも係わらず、累積リスクの増加が減少となるため、総コストは大きなアンカー導入力の場合が最小値となる。

上記の関係を明確にするために、対象年数がそれぞれ30年及び50年と設定した場合の、重要度係数 a

をパラメータとした、総コストとアンカー導入力の関係を図-1 2 ~ 図-1 3 に示す。これらの図に示すように、総コストが最小値となるアンカー導入力は、斜面の重要度及び耐用年数により異なることが明確となる。

例えば、図-1 2 に示す耐用年数が30年の場合には、重要度係数 $a=1, 5, 20, 100$ に対して総コストが最小となるアンカー導入力は、それぞれ $0, 0, 0.75, 1.5 \text{ MN/m}$ となる。また、図-1 3 に示す耐用年数が50年の場合には、重要度係数 $a=1, 5, 20, 100$ に対して総コストが最小となるアンカー導入力は、それぞれ $0, 0.25, 1.00, 1.75 \text{ MN/m}$ となる。ここで、注目すべきことは、これらの結果に示すように、斜面の重要度及び耐用年数に依れば、アンカー導入力 $T=0 \text{ MN/m}$ すなわち無対策も最適な解として与えられることは、対策工を検討する上で重要な情報を与えることを意味する。

このように、本手法を用いることで斜面の重要度及び耐用年数に応じて、総コストが最小値となる最適アンカー導入力の設定が可能となる。

c) 最適設計条件の設定

以上の検討は、確率論に基づき最適な対策工（アンカー導入力）を設定する方法について示したものである。ここでは、上述の議論と通常の確定論に基づく設計法との関連について言及する。

例えば、斜面の耐用年数を50年と設定した場合の斜面の効用（重要度係数 a ）と最適アンカー導入力との関係を図-14に示す。同図に示すように、最適アンカー導入力は斜面の効用の増加に伴い大きくなる。同図に示す関係を用いて、確定論で用いられる中央安全率をパラメータとして、斜面の効用（重要度係数 a ）と設定水平震度の関係を図-15に示す。なお、ここに示す中央安全率とは、表-1に示す強度定数の中央値を用いて、式（6）～式（7）に示すすべり抵抗力とすべり力の比として算定したものである。

同図に示す結果より、本検討で求めたアンカー導入力を作用させた場合には、それぞれどのような安全率に相当するかが明らかになる。例えば、通常の設計で採用されることが多い安全率1.2を確保するためには、本検討で構造物の重要度に応じて算定されたアンカー導入力を適用した場合に満足する設定水平震度は、0.05～0.20程度に相当することが明らかになる。

次に、図-14および図-15に示す結果から、斜面の耐用年数を50年と設定した場合、当該斜面の保有性能が、以下のように定義される。

- 1) 斜面の重要度係数 $a=10$ の場合に算定された最適アンカー導入力を適用した場合には、水平震度が0.00および0.10に対して、それぞれ中央安全率が1.5および1.2までの安定性を保有する。
- 2) 斜面の重要度係数 $a=100$ の場合に算定された最適アンカー導入力を適用した場合には、水平震度が0.12および0.20に対して、それぞれ中央安全率が1.5および1.2までの安定性を保有する。

このように、本手法を用いることで、総コスト（工事費とリスクの和）最小化の原理に基づき、斜面の目標性能として設定した重要度及び耐用年数に応じた最適アンカー導入力の設定されると共に、安定性に対する保有性能を明示することが可能となる。

4. まとめ

本研究では、斜面の安定性を評価する上で、地盤

物性及び発生地震動の不確実性を確率モデルを用いて考慮し、総コスト（工事費とリスクの和）最小化原理に基づき最適な対策工（アンカー導入力）を設定する方法について示した。この結果として得られた知見は、以下のように要約される。

- 1) 本手法を用いることで、斜面の目標性能として重要度及び耐用年数に着目した場合に、総コストが最小値となる最適アンカー導入力を設定することが可能となる。
- 2) 1)の知見に加えて、斜面の目標性能として設定した重要度及び耐用年数に応じた最適アンカー導入力の設定されると共に、安定性に対する保有性能を明示することが可能となる。

なお、本研究では、議論を簡素化するために簡易な平面すべりを対象とした検討結果について示した。しかし、本研究で提案する設計手法は、本質的には円弧すべり、トッピングなどの破壊形態が異なるモデルに対しても適用可能である。

ただし、本検討では斜面の目標性能としての重要度についてはパラメータスタディーの結果を示したに過ぎない。したがって、今後は様々な斜面に対して、重要度を定量的に評価する手法を開発することにより、本手法の有効性について検討を加えていく所存である。

最後に、本研究を行うに当たり、貴重な助言を頂いた大成建設株式会社土木設計部亀村勝美氏及び、(株)篠塚研究所鶴沢哲史氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Annaka, T. and Nozawa, Y.: A Probabilistic Model for Seismic Hazard Estimation in Kanto District, Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 2-1-13, pp. II-107-112, 1988.
- 3) 石川裕, 奥村俊彦, 亀田弘行：レベル2地震動の評価のための活断層を考慮した確率論的想定地震, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, I-B250, pp. 500-501, 1996.
- 4) 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.
- 5) Mizutani, M.: Basic Methodology of a Seismic Risk Management (SRM) Procedure, ICCOSAR '97, vol.3, pp.1581-1588, 1997.
- 6) Benjamin, J. R. and Cornell, A. A.: Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-

Hill, pp. 578-580, 1970.

7) Uzawa, T., Mizutani, M., Kamemura, K., Kotsubo, C. and Ohtsu, H. : Decision Making for Rebuilding of a structure Using SRM Method, ICCOSAR'97, vol.1, pp.483-490, 1997.

8) 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.14-4, pp.67-111, 1975.

(1998.8.27 受付)

THE METHODOLOGY ASSOCIATED WITH THE STABILITY ANALYSIS
OF SLOPES BASED ON THE CONCEPT OF THE PERFORMANCE
BASED DESIGN

Hiroyasu OHTSU, Yuzo OHNISHI and Mamoru MIZUTANI

This paper presents the new methodology associated with the stability analysis of slopes. As for current design methods, the basic concept to determine the required factor of safety is vague. Essentially, the required safety margin to slopes should vary in accordance with the utility of each slope from socio-economical viewpoints. Therefore, this study applies the concept of performance based design to take into account the utility of slopes. The conclusions make it obvious that the methodology proposed in this study is very useful in the design of slopes.