

# 斜面災害を低減するためのリスクマネジメント手法に関する研究

工学部 山本健太郎  
農学部 寺本行芳・平瑞樹

## 1. はじめに

地球温暖化などの影響により、近年、突発的な豪雨が日本各地で生じ、それに伴う斜面災害が多発している。また、従来の斜面災害に対するリスクマネジメントは、ハード対策を中心とした行政主体の公助に多くを依存してきた。しかし、地球温暖化などにより、降雨パターンが大きく変動してきているため、ハード対策のみで斜面災害に対するリスクマネジメントすることは不十分である。さらに、我が国のこれからの経済状況を見ても、ハード対策のみでリスクマネジメントを実施することは難しい。そこで、斜面災害リスクマネジメントに対しても、斜面災害を低減するために、すでに他分野で実績があるリスクマネジメント手法を適用することが注目されている<sup>1)</sup>。本研究では、斜面災害を低減するためのリスクマネジメント手法について述べる。今後、実務レベルにおいては災害警報のためのモニタリング技術や解析技術<sup>2)</sup>よりも、まず、概念的なことになるが斜面災害低減への仕組みづくりがより重要になってくると考えられる。例えば、化学プラントなどの分野においては、リスクマネジメントやリスクアセスメントが体系化されている<sup>3)</sup>。また、近年進歩が著しい数値シミュレーションをリスクマネジメントツールとして、災害シナリオの表現としてETA(Event Tree Analysis)を活用することを挙げた。これらは様々な現象を3次元でビジュアル的に把握でき、防災教育ツールとしても有効になるものと考えられる。

## 2. リスクマネジメント

斜面のリスクマネジメントとしては、リスクベースで斜面を評価し、大きな斜面災害リスクを持つ斜面からはリスク低減を実施する。一方で、どの程度の斜面災害リスクならば許容できるかが大きな問題となる。ここでは、斜面のリスクマネジメントに関して、基礎的なことを述べる。従来の、「災害が生じてから対策を施す災害再発防止」から、「災害が生じる前に方策を施す未然防止への転換」が重要であろう。図-1には最も簡単なリスク評価のためのマトリックスを示す。一般的に、リスクの定義は次のようである。

$$\text{「リスク」} = \text{「ハザードの影響の大きさ」} \times \text{「ハザードの発生確率」} \quad (1)$$

リスクは、ハザードが発生した際の影響の大きさとハザードの発生確率（頻度）の大きさとで評価される。例えば、ハザードによる影響が大きくても発生頻度が低ければ、リスクは小さいとされる。次に、図-2には斜面リスクマネジメントの一般的な流れを示す。おおまかに、要点は下記のようになる。なお、リスクアセスメントはリスク分析、及びリスク評価までと定義されており、図-2において薄く色がついている部分に相当することとなる。

- ・ 斜面に潜在する斜面災害誘因の同定を行う（斜面の幾何学条件や地質条件）。
- ・ 斜面災害が発生した場合のシナリオを検討する（災害の原因や影響など）。
- ・ 発生頻度を推定し、災害の大きさと合わせて、リスク評価（定性的、定量的）を行う。
- ・ 許容リスクを求め、リスクが大きければ、リスクを低減させるための安全対策を検討する。
- ・ 次項に述べる ALARP の概念に従って、安全対策のバランス（整合性）を確保する。
- ・ 許容できるリスクレベルならば現状の状態を承認し、リスクの監視を行い、水準を維持する。新たなリスクが生じていないか、リスクの許容値が適切であるかを見守り、必要であれば管理、

ハザードの発生頻度	高			リスク大
	中			
	低	リスク小		
		小	中	大
	ハザードの影響の大きさ			

図-1 リスク評価のためのリスクマトリックス

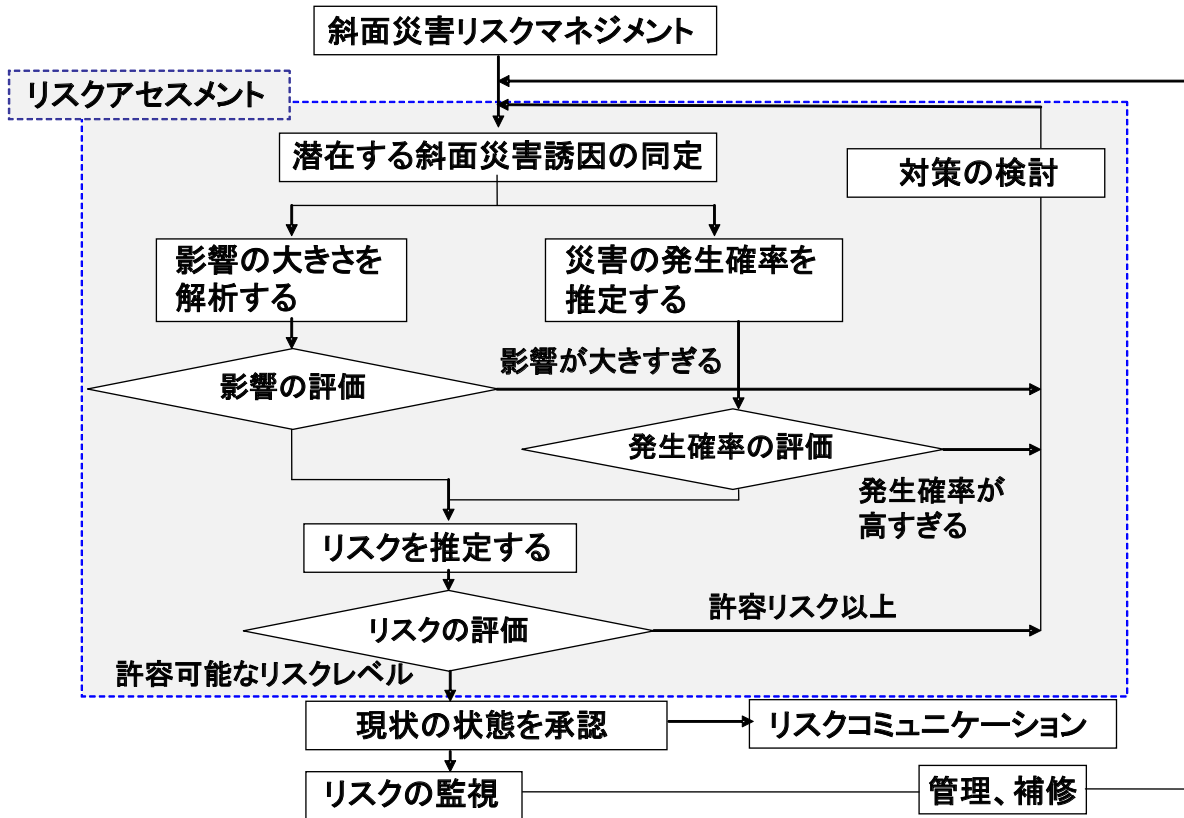


図-2 リスクマネジメントのフレームワーク

補修を実施する。

- ・ リスク情報が一部のしか伝達されていないと、せっかくの安全対策が不十分なものとなってしまいうため、地域内外でのリスクコミュニケーションも重要になる。

また、図-3 にはリスクの許容を示す。一般的に、リスクの低減を目指した安全対策を行う場合に大きな課題となるのが、「どの程度までリスクを減少させれば良いのか？」という点である。これはどこまで対策費用を使えば良いのかという課題とも大きく関連している。これに対し、リスクをできるだけ合理的に実施可能な

範囲で低く (ALARP; As Low As Reasonably Practicable) 抑えるという考え方が HSE (英国安全衛生局) により提唱され<sup>4)</sup>、無理にでもリスクをゼロに近づけようとするのではなく、リスクをある程度許容した上で、便宜を追求すれば良いとされている。図-3 において、3 角形の横幅はリスクの大きさを示し、上下の線はリスクの上限界及び下限界を示す。上限界を超えるリスクはいかなる理由があってもそのまま放置することは認められず、何らかのリスク処理対策が求められる。また、下限界以下のリスクは無視することができる領域

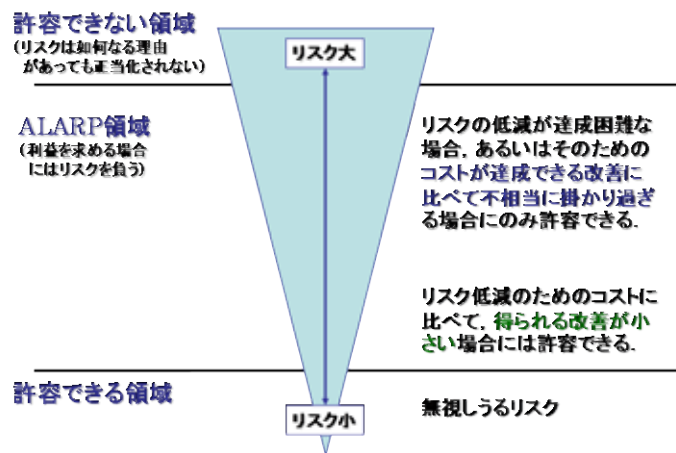


図-3 リスクの許容 [ALARP(As Low As Reasonably Practicable)]

である。これらの上下限の間にあるのが ALARP 領域である。ALARP 領域においては科学的な視点だけでなく、社会的な視点も含めて検討する必要がある。推定されたリスクが許容上限近傍にある場合、「いかなる代案を用いてもリスク低減が達成困難な場合」と「達成できる改善に比べてリスク低減に必要となるコストが不相応に高く、その合理性を立証できる場合」に限り許容される。また、許容下限近傍にあるリスクに対しては、リスク低減のためのコストに比べて得られる改善が小さい場合にはそのリスクは許容されることとなる。

よって、斜面のリスクマネジメントとしては、システムマネジメントの視点からリスク除去（リスク軽減）の取組みを実施し、どの程度までリスクを減少させることができるかが重要となってくるだろう。具体的には、ハザードによる被害規模や発生確率を小さくする手法が挙げられる。また、リスクアセスメントの目的はリスクマネジメントにおける判断の根拠を与えるために、「斜面内に潜在する危険性を発見すること」と「どこまで安全対策を実施するのか（安全対策の優先度）」を決めることとなるだろう。また、許容リスクレベルを設定することは容易ではないが、これは安全目標と言う事もでき、技術水準、地域社会情勢や社会に与える影響などを勘案して設定する必要があると考えられる。

### 3. 現地調査と原位置試験

構造物に比べると難しい面があるが、通常のカルテ点検に図-4, 5で示されるような簡易的な現地斜面調査手法（簡易貫入、検土杖や土検棒）並びに斜面変状の進行性の確認（斜面傾斜、植生の種類や樹齢、腐葉土のチェック、表層土の厚さの計測など）の提案を行う。これらを実施することにより格段と精度が上がると考えている。今後、植生が斜面安定に与える効果についての現地調査を実施していく予定である。

特に、土検棒では斜面の粘着力と内部摩擦角の推定が可能となり、斜面の安定性などもある程度は検討することができるかもしれない。これらにより、危険個所の洗い出しや事業決定の優先度を判断するための評価方法などを考察することが可能となる。また、県内における斜面の現地詳細調査や表層土の厚さの計測などを実施することにより、表層崩壊危険度マップ作成への足掛りや、植生の種類や樹齢と表層土厚との関係などを明らかにしていきたいと考えている。



図-4 検土杖による現地斜面調査



図-5 土検棒による地盤強度パラメータの推定

### 4. 数値シミュレーション

近年進歩が著しい数値シミュレーションをリスクマネジメントツールとして活用することについて述べる。本研究では地盤強度パラメータの数も少なくても済み、容易に斜面の崩壊パターンを与えることができる数値極限解析手法からの数値シミュレーション事例について述べる。斜面の安定問題などをはじめとして、地盤工学の主たる問題は正解値（厳密解）を求めることができない場合が多い。そこで、極限定理の利点と有限要素法を組み合わせることにより、極めて簡単に厳密な下界値と上界値を直接求めることができる数値極限解析が Sloan らによって開発されてきた<sup>5),6)</sup>。この手法では、下界値と上界値を用い、正解値を精度良く挟み撃ちにすることによって、

実務にも有用かつ他の解法との比較においてもベンチマークとなりうる解を提供することが可能となる。本研究では、厳密な下界、上界値を求めることが可能な数値極限解析（下界有限要素解析と上界有限要素解析）を用いるものし、それらの離散的定式化及び非線形アルゴリズムの詳細は参考文献 7), 8) にゆずる。特徴としては、最終的な最適化問題が非線形計画問題として定式化され、解の収束に関する反復が少なく、計算時間の短縮が大きく図られている。ここでは、円形掘削の安定問題を取り上げる。図-6 には典型的な有限要素メッシュと境界条件（掘削半径:  $R$ , 掘削高さ:  $H$ ）を示す。3次元崩壊メカニズムを把握するために、3次元解析を実施した。なお、掘削問題においては、崩壊時の自重が最適化されるパラメータとなり、それを全体積で割ることによって、単位体積重量  $\gamma$  を求めている。

図-7 には上界有限要素解析からの  $H/R=1$  and  $3$ 、内部摩擦角  $\phi=0^\circ, 30^\circ$  and  $50^\circ$  の時の典型的な崩壊パターンと安定係数  $N_s = \gamma H / c'$  の上界値(UB)を示す。なお、下界有限要素解析からも崩壊パターンと同様な塑性領域が得られた。まず、各  $H/R$  とともに  $\phi$  が増加するにつれて、崩壊領域が小さくなり、安定係数が増加することがわかる。また、当然であるが、 $H/R$  の増加とともに安定係数は大きくなり、 $H/R$  が大きいほど  $\phi$  の増加に伴う安定係数の増加割合も大きくなることわかる。全体を見ると、 $H/R$  と  $\phi$  が増加するにつれて、壁からの崩壊メカニズムが徐々に3次的に局所的に小さくなっていく様子も観察される。

現況では、数値シミュレーションは現象の予測や、すでに生じた現象の説明に主として用いられてきているが、斜面崩壊や地盤の破壊などの最も厳しい条件下での現象をおおまかに推定することができる。よって、当然であるが、数値シミュレーションをリスクマネジメントツールとして活用すれば、本事例のように  $H/R$  が大きく、 $\phi$  が小さい時には崩壊メカニズム（斜面災害）が大きくなることを容易に、3次元でビジュアル的に想定することが可能である。

また、3. 現地調査と原位置試験とも大きく関連するが、斜面安定に与える植生効果を取り入れた実務的解析手法の開発なども考慮していきたい。

## 5. 技術レベルでの斜面災害リスクマネジメント

2. リスクマネジメントとも大きく関連するが、ここでは技術レベルでの斜面災害リスクマネジメントについて述べる。まず、図-8 には実務レベルでの斜面災害リスクマネジメントのフロー図を示す。図に示されているように、大きく7つの項目に分類できる。① 計画準備では基本方針として、防災対策上でネックとなっている課題が挙げられる。② ハザードの把握・抽出では既往カルテデータや現地詳細調査から種々のハザードを把握・抽出することが求められ、重要な項目と言える。次に、災害シナリオの設定が求められ、災害要因（素因・誘因）、発生頻度、対策効果などを分析する必要性が生じる。図-9 にはETA（Event Tree Analysis）を用いた災害シナリオの一例を示す（落石による被災）。ここでは、被災の段階はフェーズ1～3までの落石崩壊、道路利用者の被災、住宅の被災の3つに分類され、それに伴う落石の崩壊パターンは斜面内、道路、住宅地までの3つのパターンに分類される。そして、各フェーズでNoとYesの場合を考慮すると、合計8つの被災シナリオを考えることが可能となる。

次に、③ リスクの評価では各災害シナリオごとにリスクの評価を実施することとなる。ここで、 $\text{リスク} = \text{災害の発生確率} \times \text{費用} = \text{災害の起こりやすさ} \times \text{影響の大きさ}$ で求めることができる。④ リスク処理方法の検討では、管理者の方針との調整が必要となるため、リスク低減やコスト効果を説明できる考え方が必要とされる。また、対策事業の優先度の検討も実施する必要性が生じる。⑤ リスク処理では、対策シナリオ毎に災害リスクの発生確率の低減または対策工の実施となるリスクコントロールや、リスクの顕在化に備える資金面での対応となるリスクファイナンスを実施することとなる。そして、⑥ 効果の確認を実施した上で、⑦ リスクの評価・処理方法の他地域への適用性を検討することとなる。

## 6. おわりに

これからは自然現象の中で起こりうる斜面災害を最小限にとどめる、ソフト対策であるリスクマネジメントがより重要となってくるだろう。本研究では、斜面災害リスクマネジメントのフレームワークや数値シミュレーションなどをリスクマネジメントツールとして活用していくことを提案した。結局のところ、管理レベルでは、斜面災害に関連する多くの行政や住民がリスクマネジメントを実施し、リスクをある程度許容した上で、災害が生じる前にすばやく対応できる仕組

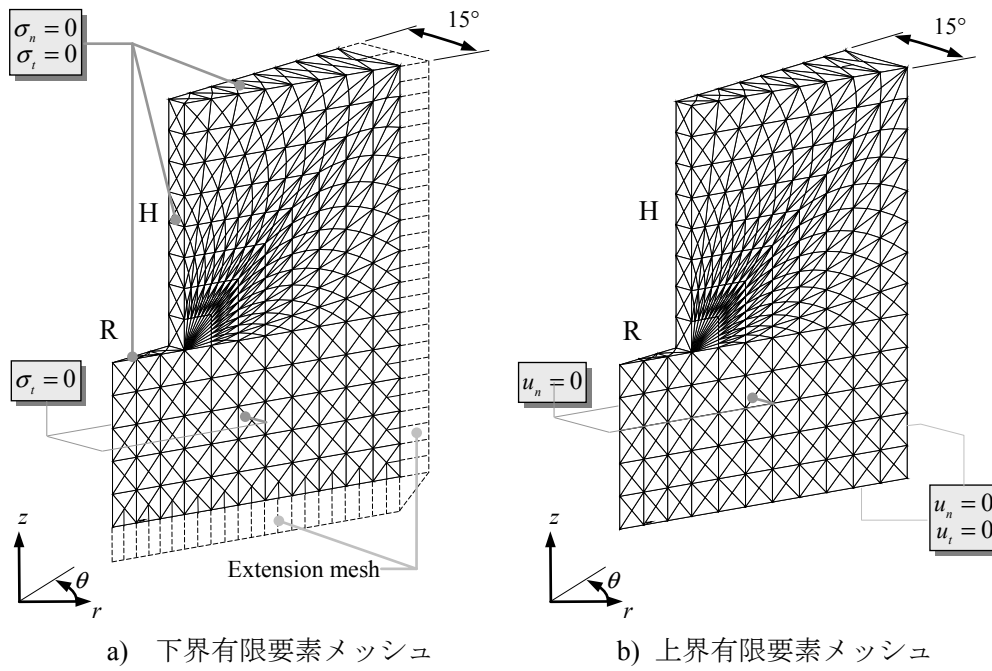


図-6 典型的な有限要素メッシュと境界条件

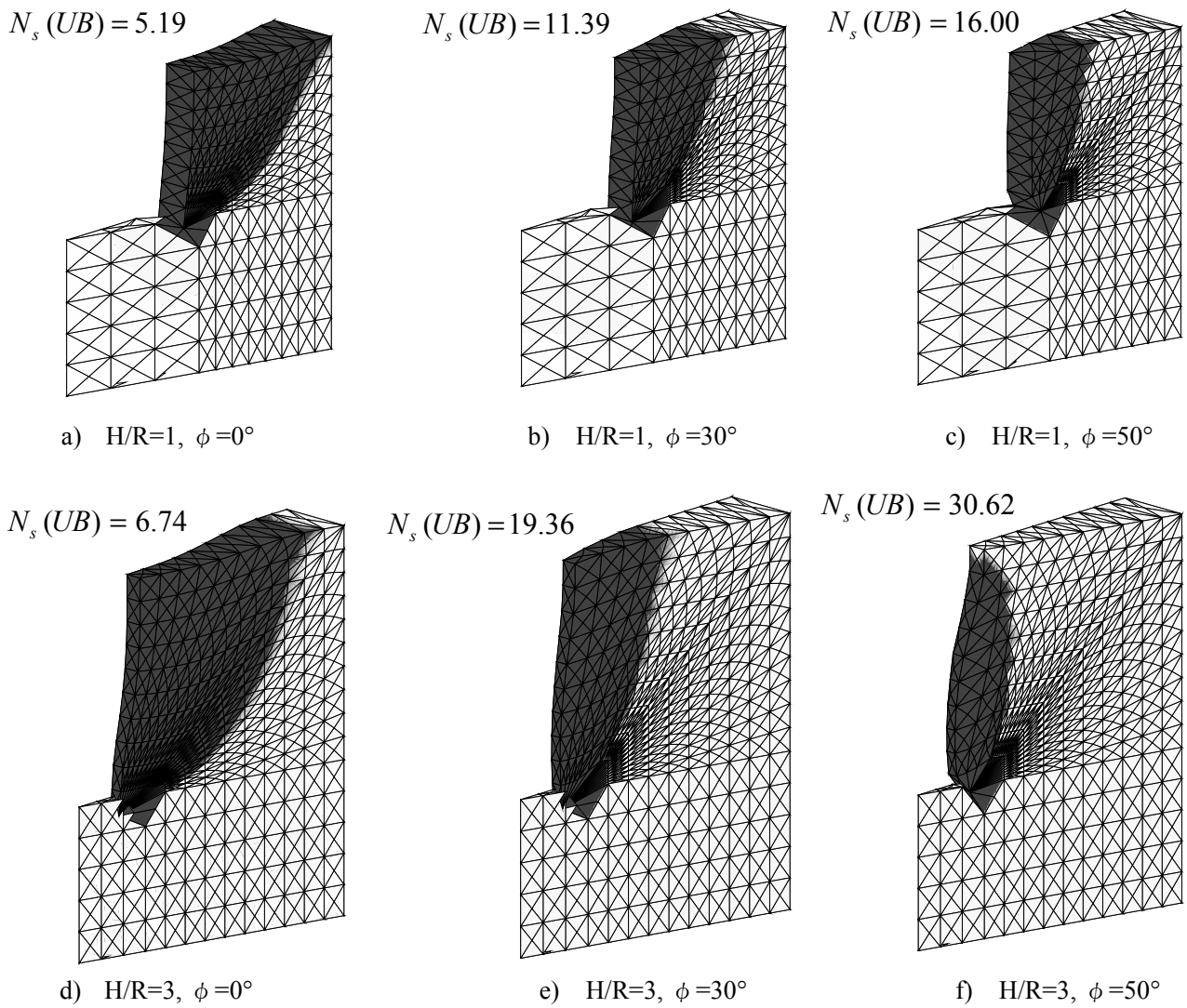


図-7 典型的な崩壊パターン

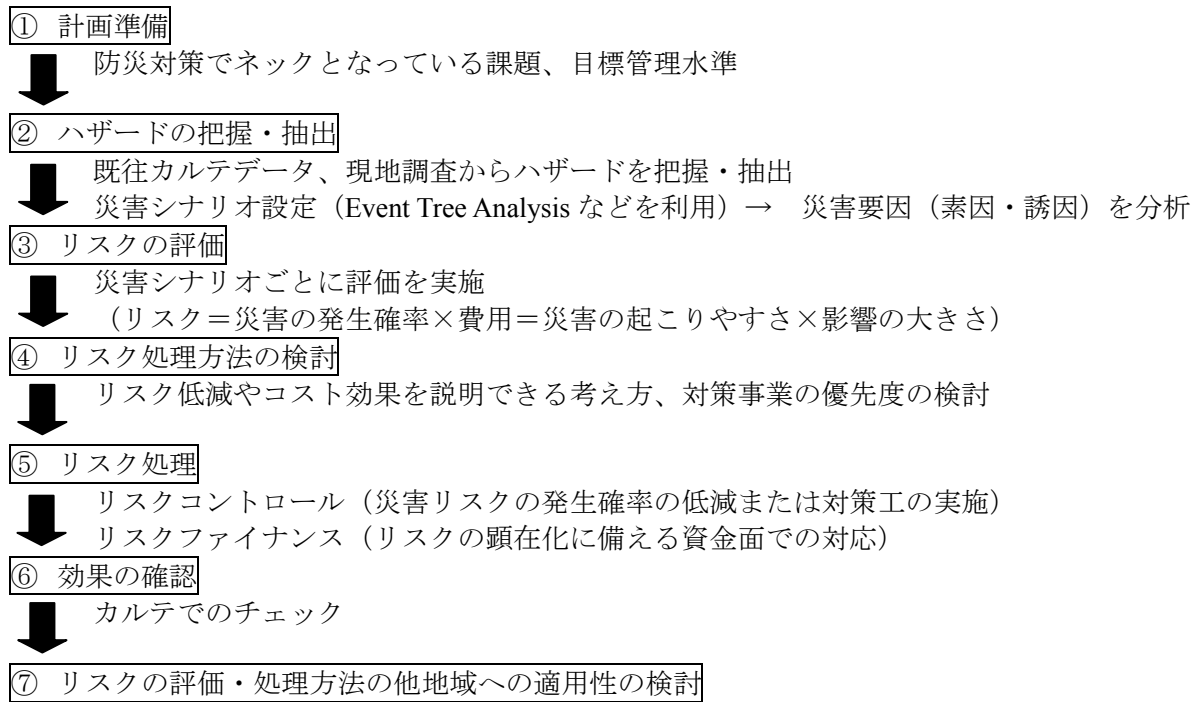


図-8 実務での斜面災害リスクマネジメント

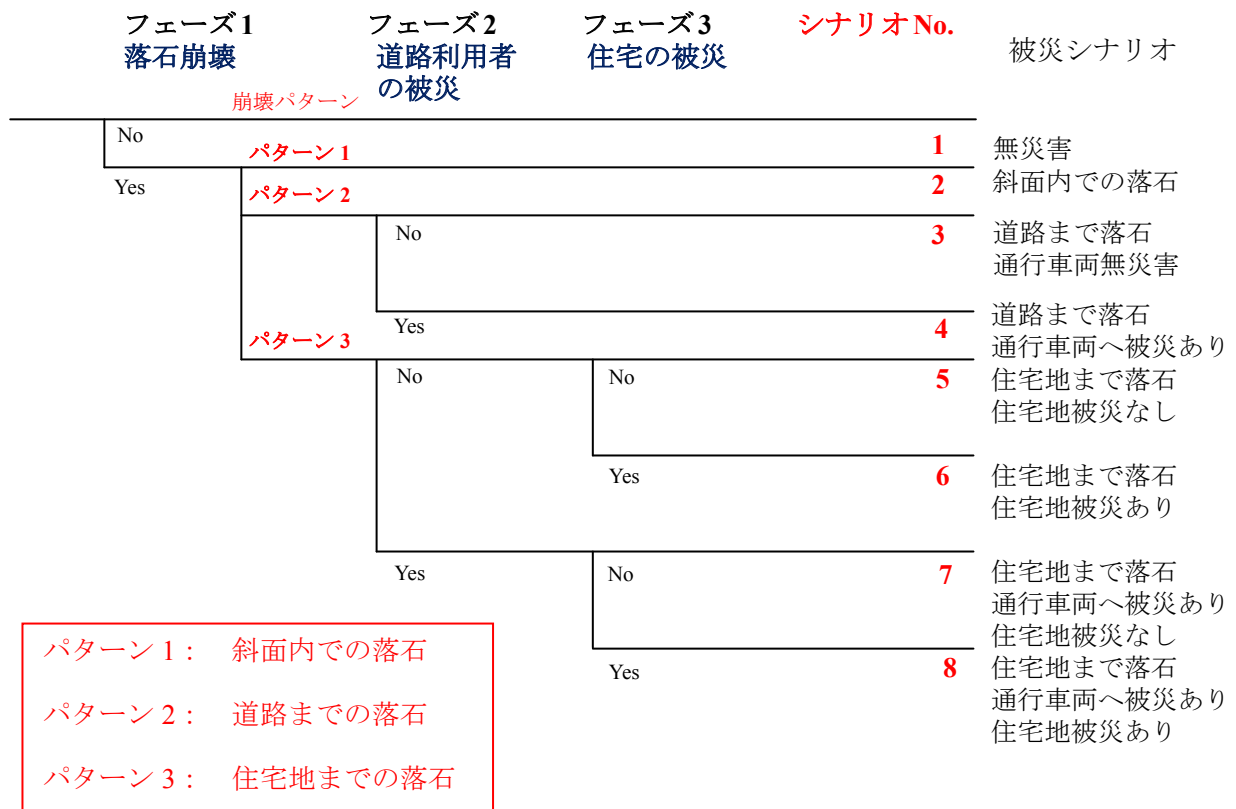


図-9 ETA を用いた災害シナリオの一例

みづくりが重要である。これらは地域の防災力を向上させ、仮に斜面災害が生じた場合さえも被害を最小化することを可能とするだろう。例えば、道路斜面における小段排水の普段からのメンテナンスは道路斜面災害リスクの低減に繋がるものと考えられる。

技術レベルでは、様々な条件下での現象を大まかにビジュアル的にも把握できる数値シミュレーション、簡易的な現地斜面調査手法に植生効果などを取り入れた新しい斜面安定評価手法、またはより実務的な対策に関する機能の成功・不成功を考えた事故シナリオの表現として ETA (Event Tree Analysis) などをリスクマネジメントツールとして、積極的に活用していくべきであると考えられる。

今後はテストフィールドを設定し、定期的に簡易的な現地斜面調査手法（簡易貫入、検土杖や土検棒）の実施や植生が斜面安定に与える効果についての現地詳細調査などを実施していく予定である。なお、我々のこれまでの現地斜面調査から植生には斜面安定機能や環境保全機能があることがわかってきた。よって、技術、環境、経済面を鑑みても全般的には、森林植生の整備とそのメンテナンスを斜面災害を低減するためのリスクマネジメントの根幹に位置付けることが妥当だろう。そのようにすれば、これまでの斜面災害が発生してからの対処ではなく、災害発生前に人為的なハザードなどはある程度、低減することができるかもしれない。

また、本報告のようにリスクマネジメントは概念だけをまとめると理解されないので、今後はなるべく具体例を挙げていきたい。さらに、リスクマネジメントはこれからの想定外の災害をもなくす、先を読んだ対策として重要になってくるが、行政目線ではなく、違った目線や観点を持たなければいつもと同じ方法となり、本当に中身のあるものにはならないだろうと考えている。

## 謝辞

全般的なリスクマネジメントの考え方は、労働安全衛生総合研究所 島田行恭氏、実務での斜面災害リスクマネジメントや簡易的な現地斜面調査手法は基礎地盤コンサルタンツ 永川勝久氏にお教え頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 日下部治: 地盤リスクを考える, 地質と調査 '08 第2号, pp.4-8, 2008.6.
- 2) 地盤工学会九州支部: 斜面災害における予知と対策技術, 2007.12.
- 3) 中央労働災害防止協会: 化学物質リスクアセスメント専門研修 (爆発・火災防止コース) テキスト, 2010.
- 4) HSE (Health and Safety Executive): Health and Safety at Work Act, 1974.
- 5) Sloan, S. W. and Assadi, A.: Stability of shallow tunnels in soft ground, In G. T. Houlsby and A. N. Schofield (eds.), *Predictive soil mechanics*, Thomas Telford, London, pp.644-663, 1992.
- 6) Lyamin, A. V. and Sloan, S. W.: Stability of a plane strain circular tunnel in a cohesive-frictional soil, In D. W. Smith and J. P. Carter (eds.), *Developments in theoretical geomechanics*, Balkema, Rotterdam, pp.139-153, 2000.
- 7) Lyamin, A.V. and Sloan, S.W.: Lower bound limit analysis using non-linear programming, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, 55, pp.573-611, 2002.
- 8) Krabbenhøft, K., Lyamin, A.V., Hjiaj, M. and Sloan, S.W.: A new discontinuous upper bound limit analysis formulation, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 63, pp.1069-1088, 2005.