第39回地すべりシンポジウム

土砂災害に関わる危険度評価と リスクマネージメント

2011. 5. 20

主催(社)日本地すべり学会新潟支部
 共催(社)地盤工学会北陸支部
 後援新 潟 県
 (社)新潟県地質調査業協会
 (社)斜面防災対策技術協会新潟県支部
 新潟県地すべり防止工事士会

~~~ 目 次 ~~~

地すべりを対象にしたリスク評価事例とリスクマネジメントの展望..... 2 日本工営(株) 松田 貞則\*

鉄道斜面の降雨時リスク評価方法 ...... 8 (財)鉄道総合技術研究所 布川 修\*・杉山 友康

道路斜面リスクの評価事例 ..... 16 応用地質(株) 杉田 理・中川 渉\*

空中写真判読に基づく地すべり危険度評価手法について ..... 22

(株)アドバンテクノロジー 濱崎 英作\*

- 信州大学 佐々木 明彦
- 山形大学 八木 浩司
- 東北学院大学 宮城 豊彦
- (株)復建技術コンサルタント 奈倉 弘

(株)テクノ長谷 前田 修吾

(\*印:発表者)

 <sup>(</sup>社)日本地すべり学会新潟支部第39回地すべりシンポジウムの開催にあたって ...... 1
 (社)日本地すべり学会新潟支部 支部長 川邉 洋

#### (社)日本地すべり学会新潟支部

#### 第39回地すべりシンポジウムの開催にあたって

本年3月11日の東北地方太平洋沖地震により、東北地方から関東地方北部の太平洋岸を 中心に、多種多様な災害が同時多発的に発生しました。また、当支部が深く関わる地域で は、翌12日の長野県北部地震により、新潟・長野県境付近の山地で地すべりがいくつか発 生し、今でも多くの方が避難生活を続けておられます。被災された皆様には心からお見舞 いを申し上げるとともに、災害研究の一端を担う団体としては、この事態を謙虚に受け止 めないといけないと思います。

今年のシンポジウムは地震前に計画されたため、今回の地震災害がテーマとはなってい ませんが、総合討論の時間の一部を借りて、長野県北部地震による災害調査の概要を緊急 報告として入れました。今後、東日本大震災の調査が進むに従い、斜面災害の詳細が明ら かになり、今後の対策に活かされていくと思いますし、またそうしなければならないと思 います。

今年のシンポジウムは、「危険度評価」と「リスクマネジメント」をキーワードに、鉄道 や道路および自然斜面における斜面災害を対象に、各分野でのリスク評価を5人の講師か ら紹介していただき、今後、「リスクマネジメント」や「危険度評価」を斜面対策へ積極的 に導入していくための参考になることを願い企画しました。

本シンポジウムが、災害防止を究極の目標としつつも、被害を最小にするという視点か ら現実的な対処をしなければならない場合の考え方について、見聞を広めるよい機会にな ることを祈念しております。

(社)日本地すべり学会新潟支部

支部長 川邉 洋

## 地すべりを対象にしたリスク評価事例とリスクマネジメントの展望

The risk assessment example and the prospects of the risk management for landslides

松田貞則(日本工営株式会社)

Sadanori MATSUDA (Nippon Koei Co.,Ltd.)

キーワード:地すべり、リスク評価、ライフサイクルコスト

Keyword : Landslide, Risk assessment, Life cycle cost

#### 1. 検討の背景

水力発電施設は、長期間の供用を前提に築造さ れるため、施設のライフサイクルが長く、地形・ 地質的な影響を受けやすい河川際に立地すること も多い。このため、供用期間中にリスクが顕在化 する可能性が比較的高い。電力自由化の進展によ り、発電原価の縮減要求が強まる状況においては、 従前より行われている一般の供用状態における耐 荷力の評価に留まらず、耐久性の低下や自然災害 等による損傷リスクを考慮した施設損傷に対する 性能評価が要求されている。しかしながら、損傷 に対するリスクを評価するためには、性能関数の 設定や損傷確率の算定、損失が発生した場合の事 業に及ぼす影響や社会的な影響、時間的な価値変 動などの様々な不確定要因を考慮する必要がある。

ここでは、施設管理の実務において合理的で経済的な水力発電施設の施設保全対策を検討する手段として、地すべり損傷リスクを考慮したマネジメントの検討事例を紹介する<sup>1),2),3)</sup>。

#### 2. 対象施設の概要

検討対象の取水施設(以降"モデル施設"と称す) は、供用開始6年目より地すべりの影響を受けて ひび割れ等の損傷が生じ、供用開始から21年経過 した現在も年間約6mmの速度で変位が進行して いる。損傷原因と想定される地すべりは幅約500m、 深さ約75mと大規模なため、地すべり防止対策を 行うためには莫大な費用を投入する必要があり、 事業に及ぼす財務上の影響が極めて大きい。一方 で、耐用年数(57年間)まで施設を延命化させて 事業を継続するためには、リスクを保有しなくて はならない。施設管理活動の意思決定において合 理的で経済的な施設保全対策を選択するためには、 経年的に増大する地すべり損傷リスクの把握が要 求される。

#### 3. 地すべり損傷リスクのモデル化

図 3-1 に地すべり損傷リスクの定量評価のフロ ーを示す。モデル施設は図 3-2 に示すように、地 すべりブロック内にある取水路と堰堤との接合部 分においてせん断のひび割れ損傷が集中しており、 その損傷モードから、片持ちのはり構造のような 状態で変形が進行していると想定した。なお、こ の構造モデルに作用する荷重は、後述する損傷度 カーブの予測値と過去の計測値(変位量)とが整 合するように 10tf/m/年と設定している。

実構造物の場合、構造モデルを構成する部材の 強度  $X_R$  と、地すべりの作用を受けて部材に発生 する応力  $X_S$ にはばらつきがある。図 3-3 はばらつ きをもった部材応力の進行と、ばらつきをもった 部材強度の関係を模式的に示したものである。部



図 3-1 地すべり損傷リスクの定量評価のフロー



図 3-2 モデル施設の地すべり損傷挙動

材応力は地すべり滑動とともに大きくなり、ある 時点から部材応力の分布は、部材強度の分布と重 なるようになる。このことは、損傷がある確率で 存在することを示している。ここでは、これらの ばらつきが対数正規分布(変動係数 0.5)になると 想定し、2つの分布の重なりの度合い、すなわち、 地すべり損傷度を評価するための性能関数 Z を式 (1)のように設定した。

 $Z = X_R - X_S \tag{1}$ 

ここに、 Ζ:性能関数

X<sub>R</sub> : 部材強度の確率変数

X<sub>s</sub>:部材に発生する応力の確率変数 そして、Z<0 ならば損傷発生、Z>0 ならば損傷 非発生とする。これをモンテカルロシミュレーシ ョンによって解析し、経過年数と地すべり損傷確 率との関係を示す損傷度カーブ(フラジリティカ ーブ)を求めた。損傷度カーブは、モデル施設の 地すべりに対する脆弱性の経年変化を表すもので





ある。

また、地すべり損傷リスクは式(3)に示すように、 地すべり損傷の発生確率と損失コストとの積で表 され、ある大きさの荷重が作用したときのモデル 施設の潜在的な損失期待値の大きさを示すもので ある。なお、ここではモデル施設の損失の大きさ を資産のもつ価値に対する百分率で表している (表 3-1)。

$$LCC_{T} = \frac{C_{R} + C_{L}}{(1+r)^{t}} + \sum_{t=1}^{T} \frac{C_{M}}{(1+r)^{t}} + \sum_{t=1}^{T} \frac{C_{risk}}{(1+r)^{t}}$$
(2)

$$C_{risk} = p_i(t) \times C_i \tag{3}$$

ここに、*LCC<sub>T</sub>* : 評価年数 T のライフサイクルコ スト

- C<sub>R</sub>:対策工事コスト
- C<sub>L</sub>:対策工事時の発電停止に伴う営業 損失コスト
- C<sub>M</sub>:維持管理コスト
- Crisk : リスクコスト (期待損失額)
- t:基準年次からの供用年
- T :評価年数
- r :割引率 (ここでは4%)
- $p_{i(t)}$ :損傷レベルiの年発生確率
- $C_i$ :損傷レベルiの損失コスト
- *i*:損傷レベルを表す添え字

#### 4. 地すべり損傷確率に基づく管理水準の設定

リスク対策の将来のシナリオを描くためには、 モデル施設の地すべり損傷レベルやリスク対策レ ベルを定量化する必要がある。地すべり損傷確率 で管理水準を定量化する場合、対象施設の供給上 の重要度や公衆安全性を踏まえて、事業者の施設 管理思想に基づき設定することになる。ここでは、 モデル施設の損傷を受容することを前提にした場 合の管理水準指標として、表 4-1 に示す各レベル に対して、それに見合う地すべり損傷確率や損失 率、リスクの大きさを考案した。また、モデル施 設の損傷レベルが加速期以上(地すべり損傷確率 50%)になると、要求機能を満たさなくなると設 定した。

| 表 4-1 | 地す~ | ミり打 | 員傷確率 | と管理 | 理水準 | との対応 |
|-------|-----|-----|------|-----|-----|------|
|-------|-----|-----|------|-----|-----|------|

| 損傷   | リスク              | リスク対策 | 損傷確率   | 損失率             | リスクの大きさ          |
|------|------------------|-------|--------|-----------------|------------------|
| レヘ゛ル | レヘ゛ル             | レヘ゛ル  | Р      | С               | $R(=P \times C)$ |
| 破局期  | 施設が損壊す<br>る可能性大  | 至急改善  | 75%以上  | 75%以上           | 56%以上            |
| 加速期  | 過度に変形す<br>る可能性大  | 改善優先  | 50~75% | 50 <b>~</b> 75% | 25~56%           |
| 進展期  | 段差・剥離す<br>る可能性大  | 改善検討  | 15~50% | 15~50%          | 2~25%            |
| 発見期  | ひび割れ発生<br>(経過監視) | 注意行動  | 5~15%  | 5~15%           | 0.3~2%           |
| 潜伏期  | 許容可能             | 通常行動  | 5%以下   | 5%以下            | 0.3%以下           |

#### 5. 定量化した地すべり損傷リスクの経年変化

図 5-1 は、モデル施設のリスク対策の比較検討 案として抽出した方策である。このうち、「地すべ り防止工」と「新規ルート工」は、対策すること で地すべりによる損傷が完全に防止または回避で きるものと考え、対策後のリスクはゼロになると した。他方で、現状のまま無対策でリスクを監視 するケースと、施設補強工と監視の強化を併用す るケースについては、今後もリスクを保有するこ とになる。ここでは、この2つのケースを対象に 地すべり損傷リスクの定量化を行った。図 5-2 は、 モデル施設の供用開始年から耐用年数である 57 年後までを評価対象期間として、再現・予測した 損傷度カーブならびにロスカーブである。「無対 策」のケースは、実際の損傷発見時期と整合する



図 5-1 モデル施設のリスク対策の比較案

ように損傷度カーブを求め、「施設補強工」のケー スは、地すべり損傷確率が機能限界水準に達した 時点で補強を実施するシナリオで予測したもので ある。

## リスクコストを含むライフサイクルコストに基づく最適案の選定

ライフサイクルコストは、図 5-1 に示す 4 つの リスク対策における対策工事コスト C<sub>R</sub> やその時 の発電停止に伴う営業損失コスト C<sub>L</sub>、維持管理コ スト C<sub>M</sub>、対策によって変化するリスクコスト C<sub>risk</sub> を式(2)、(3)に基づき算出した。評価対象期間は平 成 15 年を基準年次として、減価償却が満了するま での残存供用年数 36 年間とした。







図 6-1 リスクコストを含むライフサイクルコスト



図 6-2 累積便益(低減するリスクコスト)

|         | 残存供用年数36年間の総便益・総費用とその評価 |                  |                  |                   |  |  |  |
|---------|-------------------------|------------------|------------------|-------------------|--|--|--|
| ケース     | 低減する                    | ライフサイクル          | レコスト(総費用)        | 費田便益比             |  |  |  |
|         | リスクコスト<br>(総便益)         | リスクコスト<br>(間接損失) | リスク対策費<br>(直接費用) | (純現在価値)           |  |  |  |
| 無対策     | -                       | 177.7億円          | -                | <br>(-177.7億円)    |  |  |  |
| 地すべり防止工 | 161.8億円                 | 15.9億円           | 93.8億円           | 1.48<br>(52.1億円)  |  |  |  |
| 施設補強工   | 103.1億円                 | 74.6億円           | 1.9億円            | 1.35<br>(26.6億円)  |  |  |  |
| 新規ルートエ  | 161.8億円                 | 15.9億円           | 15.3億円           | 5.19<br>(130.6億円) |  |  |  |

表 6-1 費用対効果分析の結果

リスク対策は事業戦略上の投資として実施され るため、リスク対策に係わる費用と、それにより発 生する便益(リスクコストの低減効果)を相対的に 評価し、経済的な観点からその対策の正当性を評 価する必要がある。ここでは、費用対効果分析に 用いられる一般的な指標のうち、□費用便益比 (B/D, Cost Benefit Ratio: CBR)および□純現在価 値(B-C, Net Present Value: NPV)を用いて評価を 行った。表 6-1 にその結果を示す。この結果から 正当な投資と評価できるのは、「施設補強工」と「新 規ルート工」の2案であり、両者はほぼ同額であ ることを確認した。

#### 7. 財務インパクト評価

表 7-1 は残存供用期間中(36 年間)において発 生する各年の費用を示したものである。このうち、 「新規ルート工」のケースは、リスク対策に要す るコストとリスクを保有することによるコストの 最小和の観点から、費用対効果分析において正当 な投資と評価されたが、リスク回避のために要す る対策コストが14.5 億円となり、表 7-2 に示すよ うに、当該事業においては内部留保資金の取り崩 しが必要となる。本事例では、単年度予算の財務 インパクトから「施設補強工」が最も有効な対策 であると結論づけた。

|         | 残存供用年数36年間で発生する年費用                     |                                       |  |  |  |
|---------|----------------------------------------|---------------------------------------|--|--|--|
| ケース     | 年リスクコスト<br>(B/S上に表れない負債=<br>オフ・パランス負債) | 年リスク対策コスト<br>(資本的支出または修繕費と<br>して取り扱う) |  |  |  |
| 無対策     | 1.2億円                                  | _                                     |  |  |  |
| 地すべり防止エ | 0.9億円                                  | 93.8億円<br>(工事費)                       |  |  |  |
| 施設補強工   | 0.8億円                                  | 0.2億円<br>(補強費)                        |  |  |  |
| 新規ルートエ  | 0.9億円                                  | 14.5億円<br>(工事費)                       |  |  |  |

表 7-1 残存供用期間中に発生する年度費用

#### 表 7-2 財務インパクト評価の指標

| -         |                      |                     |                                 |  |  |  |  |
|-----------|----------------------|---------------------|---------------------------------|--|--|--|--|
|           | 年間投入費用の限度額           |                     |                                 |  |  |  |  |
| 保全の<br>観点 | 発電所単位の収益<br>管理に基づく保全 | 事業全体の収益管理<br>に基づく保全 | 施設重要度に基づく<br>重点保全               |  |  |  |  |
| 評価指<br>標  | 発電所の年間利益             | 事業全体の年間利益           | 内部留保資金<br>(手元流動性残高)             |  |  |  |  |
| 限度額       | 1億円/年                | 12億円/年              | 70億円<br>(=内部留保資金<br>-年間事業費×0.3) |  |  |  |  |
| ※内部留保資    |                      | 一引当金一貯蔵品            |                                 |  |  |  |  |

年間事業費の30%は、公益事業を適切かつ継続的に行うために最低限必要な内部留保資金とした。

#### 8. 地すべり災害のリスクマネジメントの展望

社会資本整備の分野では、地震、降雨、地すべ りなどの自然というリスクを、どのように予測お よび評価して対処するかが、事業や施設の管理の 大きな課題のひとつであり、この他にも現場では、 コスト管理、工程管理、労務管理、安全管理、情 報管理など、様々な管理でリスクとの対応をして きており、その意味ではリスクマネジメントの概 念は、最近になって導入が始まったものではない。

しかし、現在のリスクマネジメントは、現場に とどまらず、当該組織の事業活動あるいは当該事 業によって影響を受ける利害関係者に潜在するリ スクを把握し、リスクに対する最適な対処方法を 実施する組織の運営全体の考え方になりつつある。 直近に発生した東北地方太平洋沖地震をみても、 公共性の強い社会資本整備の分野でリスクが発生 した際には、機能低下や機能不全による社会的影 響は広範にわたり、その規模は極めて大きいと実 感することができる。そして、その社会的損失は 最後には国民に帰属する。そういう面を考慮する と、社会資本整備においては、リスクマネジメン トが民間組織以上に重要となる。地すべりを対象 とする防災分野においては、長期化することの多 い地すべり災害による社会的被害を最小化するた め、リスクマネジメントの積極的な導入が求めら れる。地すべり災害や斜面災害を対象にして、リ スクマネジメントの検討やリスク評価手法の研究 を行っている事例はまだ少ないが、近年増えてき ている 4),5),6),7),8)

今後、地すべりを対象とする防災分野で整合性 の取れた議論をしていくためにも、改めて「リス ク」とは何か、それに対処する活動体系としての 「リスクマネジメント」はどうあるべきか、につ いて以下に筆者なりの整理を行った。

「リスク」とは、発生しては困る危険や損害の ことであり、リスクのない目指すべき理想状態を 明確にし、それに近づけるための活動が「リスク マネジメント」といえる。このように考えると、 「リスク」とは、目指すべき目標値あるいは実現 できる最善から逸脱する可能性があり、かつ、そ の影響を短時間に回避・抑制できないような事象 と定義することができる。この定義の特徴は、目 指すべき理想を明確に意識していることを前提と する点にある。目標とする最善の状態や値をまず 議論し、それからの逸脱の可能性を検討する。ま た、リスク評価においては、「可能性」の検討も重 要であるが、「影響」の大小にも留意する必要があ る。社会の対応能力が問われる。自然現象として の地すべりの発生を全て制御できなくとも、社会 的現象といえる地すべり災害はマネジメントする ことが可能である。

地すべり災害などの自然災害は、自然現象が社 会に対する災害外力として働くことによって生じ、 これに対して社会がどの程度脆弱であるかによっ て、被害の大きさが左右される。このように考え ると、「リスク」の大きさは、次のように数式的に 表すことができる。

リスク=
$$\frac{可能性×影響度}{対応能力}$$
 (4)

地すべりの発生は、すべり面を形成する地質構 造などの素因があり、短時間で局所的な降雨の集 中に伴うすべり面の間隙水圧の上昇などが誘因と なって発生する。蓄積された観測データを用いて これらの災害外力を評価し、地すべり防止計画の 検討に使われる。気象は元来変動性を有しており、 その極端な場合に豪雨が生じる。昨今叫ばれてい る気象変動とは、その変動性が変化することであ り、過去のデータに基づいて想定された災害外力 を超える、つまり想定外の極端事象が発生する「可 能性がかなり高い」あるいは「可能性が高い」状 況下で、また現時点ではその評価に依然として大 きな不確実性が含まれている中で、国民の安心・ 安全を確保するためにどのような方策が取れるの であろうか。地すべり防止対策は必要であるが、 財源は限られており、想定される地すべり全てに 対してハード対策で対処することは現実的でない。 また災害外力に対抗する地すべり防止機能を増強 しても、その後の維持管理をますます困難にし、 機能低下や機能不全時の被害も極めて甚大となる。 このような状況下でリスクに対応するための方策 を選び、方策実施のための合意形成が必要となる。 地すべりを対象とする防災分野のリスクマネジ

メントにおいては、直接的な被害に着目するだけ でなく、周辺地域社会への被害波及も含め、災害 に対して粘り強く抵抗し、万一災害が発生しても できるだけ早期に復旧・復興ができる社会の構築 という考え方が必要であり、対応能力の向上を図 りリスクを低減するリスクコミュニケーションが 重要な活動となる。

地すべりは、その規模によって利害関係者の地 理的分布の範囲が異なり、市町村レベルでは、よ り直接的なコミュニケーションが肝要となる。大 規模になれば対象地域の特徴を把握するための体 制や過程を綿密に計画してコミュニケーションを とることが必要である。また、専門家によるリス ク認知は、専門的な科学技術知識に基づく可能性 や影響度の評価と、費用や便益などの計算に依拠 しているが、地域住民のリスク認知は、不確実な 事象に対する主観的な可能性や影響度の想像、不 安や恐怖、楽観、受け入れ可能性などの統合され た認識であり、人に共通する情報処理能力の限界 と、知識、価値観、性格などの個人差に依拠して いる。このような地域住民のリスク認知を踏まえ て、方策決定を行っていくためには、リスクに関 する事実と分析過程を分かりやすく地域住民に提 供し、地域住民の多様な議論や各自の選択を集約 していくことが必要となる。

最後に、地すべり災害に対する対応能力を高め



図 8-1 事業の影響範囲と利害関係者の関係 9)

るための取り組みとして、次の三項目を提案した い。第一は徹底したリスクアセスメントの実施で ある。地すべりを対象にしたリスクアセスメント では、地すべりの運動特性や崩壊の形態、被害発 生の想定地域や対象、地すべり発生による周辺地 域社会への被害波及などが分析・評価の対象とな る。第二は、地域に応じて目標とする最善の状態 や値を定めるための評価軸と評価指標を検討する 必要がある。定性的な情報も多いことから、AHP

(Analytic Hierarchy Process:階層分析法)の活用 も有効である。第三は住民参加型協議の推進であ り、リスクアセスメントや対策のオプションをも とに、専門家や実務者とともに、科学的、社会的、 文化的、経済的な多方面からの協議と合意形成を 進める必要がある。

リスクマネジメントの積極的な導入による「対応能力の高い社会づくり」、これは地すべり災害に 負けない持続可能な社会を営む、新たな社会資本 整備の一歩になるものと期待する。

#### 参考文献

- 岩間倫秀、他(2009):地すべり地内の導水トンネルにお けるライフサイクルコストの検討、日本地すべり学会誌、 Vol. 46、No.4、pp.245-250
- 2) 松田貞則(2006):水力発電土木施設のリスクアセスメント、こうえいフォーラム、Vol.14、pp.1-6
- 3) 松田貞則(2004):水力発電土木設備のライフサイクルマネジメントに関する一考察、土木学会第59回年次学術講演会、VI-352、pp.701-702
- 4) 上野雄一 (2005): 斜面災害のリスクマネジメント (その 1)、地すべり技術、Vol.31、No.3、pp.15-25
- 5) 野村康裕、藤澤和範(2006):地すべりの運動特性を考慮 したリスクマネジメント、地すべり、Vol.42、No.6、pp.11-18
- 6) 藤澤和範、他(2007):地すべり災害の社会的影響評価と リスクマネジメント、土木技術資料、Vol.49、No.4、pp.52-57
- 小俣新重郎(2009):岩盤崩壊災害の不確実性を考慮した リスクマネジメントの検討、土木学会論文集、Vol.65、 No.4、pp.767-775
- 8) 桑野健、他(2007):岩盤崩壊のリスク評価に向けたハザ ードマップ作成に関する研究、土木学会論文集、Vol.63、 No.3、pp.901-912
- 9) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (2006):社会資本 整備における住民とのコミュニケーションに関するガイ ドブック、国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報 告、No.10、pp.5-1-5-2

### 鉄道斜面の降雨時リスク評価方法

A method to evaluate disaster risk for rainfall-induced slope failure on rail road lines 布川 修(鉄道総合技術研究所)<sup>\*\*</sup>, 杉山 友康(鉄道総合技術研究所) Osamu NUNOKAWA, Tomoyasu SUGIYAMA (Railway Technical Research Institute) キーワード:鉄道,斜面,降雨,リスク評価

Keywords: rail road, slope, rainfall, risk estimation method

#### 1. はじめに

鉄道沿線に存在する盛土や切土(以下、斜面と いう)が降雨によって崩壊し、列車の運行を阻害 する災害が発生することがある。こうした斜面災 害から旅客や列車の安全を確保するためには、災 害が発生する恐れのあるすべての斜面にのり面防 護工などのハード対策を実施し、斜面の降雨に対 する耐力(以下、耐雨性という)を向上させるこ とが理想である。しかし、沿線には数多くの斜面 が存在し、ハード対策を実施するための年間予算 も限られていることなどの理由から段階的にハー ド対策を実施している。そのため、鉄道ではハー ド対策と所定の雨量値を超えたときに列車の運行 を規制するなどのソフト対策を組み合わせて実施 することで、列車の安全を確保している。

ハード対策実施の優先順位や方法は、定期的な 検査の結果から判断した斜面の健全度や斜面が位 置する線区の重要度、営業収益など別々の指標を もとに経験的に決定しているのが現状である。し かし、これらの指標を考慮でき、かつ定量的な単 一の指標で災害の危険性が評価できれば、より効 果的な斜面防災対策を実施することが可能となる。

そこで本稿では、リスク評価手法を適用するこ とで、降雨時に発生する斜面災害の発生確率や発 生時の損失を算出し、これらから災害に対する危 険性をリスクという単一の指標で評価する方法に ついて述べる。

#### 2. リスクの定義

図-1に示すように、旅客数が異なるA、B、C の3線区に斜面が存在する場合、例えば、「斜面 の健全度」と「旅客数」が個別に定量化されてい ても、これらを総合して斜面災害の危険度を評価 する指標がなければ、防災対策の順位や方法を定 量的に決定することは困難である。そこで、本研 究では、降雨の地域特性、運転規制値、斜面の耐 雨性、路線の営業収益や崩壊規模から想定される 災害発生時の損失等を考慮して斜面の降雨時リス クを算出する方法について検討した。

鉄道ではある雨量値を超えたときに列車の運行 を規制する運転規制が実施されている。図-2 に 運転規制における雨量指標と規制値との関係の例



図-1 3線区に斜面が存在する場合の例



確率事象



図-3 降雨時に想定される事象

を示す。在来線では一般的に、12時間以上降雨が 中断しない場合を一連の降雨として、降り始めか らその時刻までの降雨量の累積値を連続雨量Rと 定義し、現時刻におけるこの値と時間雨量rが図 -2に示す階段状の規制値の線を越えた場合に列 車の運行を規制している<sup>1)</sup>。なお、規制方法とし て、列車の速度を徐行させる場合と運転を中止さ せる場合とがある。

ここで、降雨時に列車の運転が規制されていな いときに斜面が崩壊した場合、崩壊土砂に列車が 乗り上げるなどの被害が発生する可能性が高まる が、速度徐行の規制が発令されている場合はこう した列車の被害が発生する可能性が低くなり、さ らに中止規制(列車の運行停止)が発令させてい る場合は、崩壊の応急・復旧費のみが被害として 発生することが想定される。このように、列車の 運転を規制しているかどうかにより発生する被害 の程度が異なる。そこで、鉄道沿線斜面の降雨時 リスクを算出するために、降雨時に想定される事 象を図-3 に示すとおりイベントツリー形式で設 定した。

具体的には、ある規模の降雨が発生した場合を、 降雨量と降雨時運転規制の規制値との比較により、 運転規制なし、徐行規制、中止規制の3種類に判 別する。さらに、斜面崩壊の有無と発生時間帯(運 転時間の内外)により場合分けし、運転時間内に 列車運行が中止されずに斜面が崩壊した場合につ いては、さらに車両等被害の有無により場合分け する。したがって、降雨時に想定される事象とし て13パターンが設定される。なお、上記の場合 分けのうち、斜面崩壊の有無、発生時間帯、車両 等被害の有無は確率的な事象である。

このイベントツリーをもとに、斜面の降雨時リ スクは、信頼性解析手法 <sup>2</sup>に準拠して式(1)、(2) により求める。

 $R_{isk} = \Sigma \quad (P_i \times C_i) \quad (i = 1 \sim 13) \tag{1}$  $P_i = p_i \times n_i \tag{2}$ 

ここで、

- *R*<sub>isk</sub>: 斜面の降雨時リスク(円/年)
- *P<sub>i</sub>*:降雨時に想定される事象 *i*の年間発生頻度 期待値(回/年)
- *C<sub>i</sub>*:降雨時に想定される事象 *i* が生じた時の損失(円/回)
- pi:降雨時に想定される事象 iの発生確率
- n<sub>i</sub>:降雨時に想定される事象 *i*の年間降雨頻度 期待値(回/年)

すなわち、斜面の降雨時リスクを降雨時に想定 される年間あたりの損失期待値と定義する。そし て、降雨時に想定される各事象の発生確率と年間 降雨頻度期待値を乗じることで各事象の年間発生 頻度期待値を求める。さらに、これと損失とを乗 じることで各事象のリスクを求め、これらすべて を足し合わせることで斜面の降雨時リスクが算出 できる<sup>3)</sup>。

#### 3. 各事象の発生確率の算出

各事象の発生確率を算出するためには、図-3 のイベントツリーに示したとおり、降雨時の運転 規制を考慮して、斜面崩壊の有無、発生時間帯、 車両等被害の有無を確率的に求める必要がある。 ここでは、斜面崩壊の発生確率算出方法を中心に 述べる。

(1) 限界雨量に基づく斜面の危険度評価手法

降雨による斜面崩壊の発生確率を求めるために は、対象斜面がどの程度の降雨量で崩壊するか、 すなわち耐雨性を降雨時の運転規制の雨量指標を 考慮して評価する必要がある。さらに、鉄道沿線 に数多く存在する斜面を対象とした場合、比較的 簡易な調査によって得られるデータから耐雨性を 評価することが実務的である。そこで、本研究で は耐雨性の評価手法として、岡田ら<sup>4),5</sup>、杉山ら <sup>6)、</sup>のが開発した限界雨量に基づく斜面の危険度評 価手法を用いる。この手法は、盛土や切土の各種 条件から崩壊の可能性が高まる雨量(限界雨量と 定義している)を算出し、この雨量を鉄道で実施 されている降雨時運転規制の雨量指標上に表すも のである。

鉄道の降雨時運転規制の雨量指標上に限界雨量 を表した例を図-4 に示す。図に示すとおり、後 述する盛土・切土(崩壊の形状を表層崩壊と深層 崩壊に区別している)ごとに設定された評価基準 を用いて算出される限界雨量 Lは、以下の式によ り連続雨量 Rと時間雨量 rを軸とした平面上に曲 線(以下、限界雨量曲線という)で表される。

 $L=R^m \cdot r^n$ (3) ここで、m、n:定数

定数 m、nは、盛土の場合 m=0.3、n=0.34)、



| 基本点           |                        | 13.14                                                                    |                                                                              |                                |                 |  |  |
|---------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------|--|--|
|               | 条件                     | 条件(上段)と評価点(下段)                                                           |                                                                              |                                |                 |  |  |
| 盛土の<br>構造条件   | 盛土高さ<br><i>H</i> (m)   | P =                                                                      | $P = -3.18 \times 10^{-3} H^2 - 7.09 \times 10^{-2} H + 7.87 \times 10^{-1}$ |                                |                 |  |  |
|               | 土質 S <sub>E</sub>      | 粘性土                                                                      | 砂質土                                                                          | 礫質土                            |                 |  |  |
|               |                        | -1.05                                                                    | 0.07                                                                         | 0.14                           |                 |  |  |
|               | 貫入強度<br>N <sub>C</sub> | P =                                                                      | $-9.79 \times 10^{-3} N_c^{-3}$                                              | $^{2}+4.75\times10^{-1}N_{C}-$ | 2.24            |  |  |
| 基盤条件          | 表層地盤の地                 | 沖積                                                                       | 地盤                                                                           | その                             | ⊃他              |  |  |
|               | 質 S <sub>B</sub>       | -0                                                                       | .38                                                                          | 0.22                           |                 |  |  |
|               | 地盤の傾斜角                 | 平                                                                        | 坦                                                                            | 10 度以上                         |                 |  |  |
|               | $\theta_B$             | 1.1                                                                      | 34                                                                           | -1.10                          |                 |  |  |
| 集水·           | 透水係数                   | $k \le 10^{-4}$                                                          | $10^{-4} \le k < 10^{-3}$                                                    | $10^{-3} \leq k < 10^{-2}$     | $10^{-2} \le k$ |  |  |
| 浸透条件          | k (cm/s)               | -0.17                                                                    | 0.26                                                                         | -0.41                          | 0.86            |  |  |
|               | 集水地形                   | 無し                                                                       | 対象側                                                                          | 反対側                            |                 |  |  |
|               | $W_G$                  | 0.52                                                                     | -3.23                                                                        | -1.83                          |                 |  |  |
|               | 縦断形態                   | 切盛境界・                                                                    | · 落込勾配                                                                       | 平坦・単勾配                         |                 |  |  |
|               | $T_L$                  | -0                                                                       | .53                                                                          | -0                             | .30             |  |  |
|               | 横断形態                   | 純                                                                        | 盛                                                                            | 片切片星                           | 整・腹付            |  |  |
|               | $T_H$                  | 0.1                                                                      | 21                                                                           | -0                             | .16             |  |  |
| 経 験 雨 量<br>条件 | 経験雨量<br>$R_E$ (mm)     | $P = -1.06 \times 10^{-10} R_{E}^{2} + 5.50 \times 10^{-5} R_{E} - 2.96$ |                                                                              |                                |                 |  |  |
| 防護工           |                        | 防護日                                                                      | 二種類                                                                          | 効界                             | 見点              |  |  |
| (効果率 10       | 0%の場合)                 | プレキャン                                                                    | 、ト格子枠                                                                        | 4.1                            | 26              |  |  |
|               |                        | 張ブロ                                                                      | ュック                                                                          | 3.1                            | 35              |  |  |

表-1 盛土の評価基準(文献 4)を一部修正・加筆) <sup>κ<sup>0.3</sup>・κ<sup>0.3</sup>=基本点+Σ(評価点)</sup>

切土(表層崩壊)の場合 m=0.2、n=0.9<sup>5</sup>、切土

(深層崩壊)の場合 m=0.4、n=0.2<sup>6</sup>)、である。 表-1 に例として盛土の限界雨量を算出する評 価基準を示す。この評価基準は、崩壊事例データ を用いて、盛土が崩壊したときの実降雨(連続雨 量 Rと時間雨量 r)を式(3)に代入することで求 まる限界雨量を目的変数とし、盛土の条件を説明 変数として実施した数量化 I 類解析の結果から作 成されている。評価基準には基本点と盛土条件ご との評価点が定められており、評価対象の条件か らこれらを求めて加算することで限界雨量を算出 する。

限界雨量が大きいほど斜面の耐雨性が高く、図 -4の右上に限界雨量曲線が表される。また、斜 面に張ブロック等の防護工が施工された場合には、 表-1に示したとおり,防護工の効果点が現状の 限界雨量に加算されるため,耐雨性が向上するも のとして評価される<sup>7</sup>.

(2) 斜面の崩壊発生確率

前節で説明したとおり、本研究で耐雨性を評価 するために利用する限界雨量に基づく斜面の危険 度評価手法は、過去の崩壊事例データを用いた統 計解析の結果をもとに作成されている。したがっ て、崩壊事例データを用いて、実際の崩壊時の降 雨(連続雨量 Rと時間雨量 r)を式(3)に代入する ことで求まる限界雨量  $L_a$ と、斜面条件から表-1 に示した評価基準により求まる限界雨量  $L_b$ との 値には残差が生じる。データ数が多い統計解析の 場合、 $L_a$ と  $L_b$ の残差は一般的に平均 0、標準偏差  $\sigma$ の正規分布に従う。

ここで、限界雨量に基づく斜面の危険度評価手



図-6 崩壊発生確率ごとの限界雨量曲線<sup>)8)</sup> (盛土, L=12の場合)

法を、この手法作成時に使用していない全く別の 盛土や切土、すなわち崩壊の恐れが高い盛土や切 土に適用する場合を考える。この場合において表 -1に示した評価基準により求めた限界雨量 Lが、 前述した評価基準作成時のデータで求めた La と  $L_b$ の残差と同じばらつきを持つと仮定すると、図  $-5^{80}$ に示すように限界雨量に応じた崩壊発生確 率が得られる。図-5から、崩壊発生確率ごとの 限界雨量曲線を表すと図 $-6^{80}$ に、この図を三次元 的に表すと図 $-7^{80}$ のような崩壊発生確率分布が 得られる。

図-7 を用いることで、連続雨量 *R*、時間雨量 *r*に応じた斜面の崩壊発生確率を算出することが できる。

(3) その他の発生確率

発生時間帯の確率、すなわち運転時間内外別確 率は、対象とする斜面を通過する始発列車から最 終列車までの時間を算出し、1 日におけるその割 合を求めることで算出することができる。

車両被害の有無別発生確率は、斜面崩壊の形状 や規模、線路脇の対策工の有無、線路の線形(直 線あるいはカーブ区間)などにより決定されると 考えられる。なお、斜面崩壊の形状や規模を予測 <sup>9</sup>すれば、この発生確率を求める際の参考となる。

#### 4. 降雨の年間頻度期待値の算出

降雨の年間頻度期待値を算出する際には、斜面 崩壊の発生確率と同様に、降雨時運転規制で用い られている雨量指標を考慮する必要がある。この ため、連続雨量*R*と時間雨量*r*を軸とした年間降雨 頻度期待値の分布を作成する方法について検討し た。

降雨頻度を求めるためには、連続する降雨を1 降雨とし、1降雨の代表値を定義する必要がある。 本研究では、降り始めから連続雨量が0となるま でを1降雨とし、1降雨において式(3)と同じ式を用 いて求まる降雨指数 $S(=R^mr^n, m, n$ は係数)が 最大となるときの連続雨量Rと時間雨量rを1降雨 の代表値とした。

対象斜面近傍の年間降雨頻度期待値分布の作成 方法は次のとおりである。1)対象斜面近傍のアメ ダス観測所データ等の降雨履歴を分析し、年間降 雨頻度分布を作成する。2)上記1)で得られた降雨 頻度分布を時間雨量1mm/hごとに区分し、それぞ れの区分で連続雨量の小さい方に累積させた頻度 分布(以下、条件付き累積降雨頻度分布という) を作成する。3)上記2)で得られた条件付き累積降 雨頻度分布を3次元の関数式で近似する。4)上記 3)で作成される近似した条件付き累積降雨頻度分 布から年間降雨頻度期待値分布を作成する。なお、 上記で述べた条件付き累積降雨頻度分布は、時間 雨量ごとにある連続雨量を超える降雨の頻度分布 と定義できる。

例として、アメダス観測所「東京」のデータ (1976年~2007年の32年間)を用い、降雨指数











|                                             |                 | 各事象                                      | の発生確率 p <sub>i</sub> =p             | <sub>ai</sub> ×p <sub>bi</sub> ×p <sub>ci</sub> | ]                                                   |            | 損失項 | 頁目  |          |                        |                      |                                           |
|---------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------|-----|-----|----------|------------------------|----------------------|-------------------------------------------|
| 初期<br>イベント<br><i>n<sub>i</sub></i><br>(回/年) | 規制の有<br>無判別<br> | 崩壊の有<br>無別発生<br>確率 <i>p<sub>ai</sub></i> | 運転時間内外<br>別確率 <i>p<sub>bi</sub></i> | 車両等被<br>害の有無<br>別発生確<br>率 <i>p<sub>ci</sub></i> | 各事象の<br>年間発生頻<br>度期待値<br>(回/年)<br><u>P,(=p;×n;)</u> | 車両等<br>被害額 | 応急費 | 復旧費 | 営業<br>損失 | 損失<br>(円/回)<br>(合計)    | 各事象の<br>リスク<br>(円/年) | 斜面の<br>降雨時<br>リスク<br>(円/年)                |
| 降雨                                          | 規制なし            | 崩壊なし                                     |                                     |                                                 | <i>P</i> <sub>1</sub>                               | _          | -   | _   | -        | <i>C</i> <sub>1</sub>  | $P_1 \times C_1$     |                                           |
|                                             | _ L             | 崩壊あり                                     | 重転時間 外                              |                                                 | P <sub>2</sub>                                      | -          | 0   | 0   | 0        | <i>C</i> <sub>2</sub>  | $P_2 \times C_2$     |                                           |
|                                             |                 |                                          | └ 運転時間 内 -                          | 被害なし                                            | P <sub>3</sub>                                      | -          | 0   | 0   | 0        | $C_3$                  | $P_3 \times C_3$     |                                           |
|                                             |                 |                                          |                                     | └ 被害あり ─                                        | $P_4$                                               | 0          | 0   | 0   | 0        | $C_4$                  | $P_4 \times C_4$     |                                           |
|                                             | └ 徐行規制          | 崩壊なし                                     | ┏ 運転時間 外 -                          |                                                 | $P_5$                                               | -          | -   | -   | -        | $C_5$                  | $P_5 \times C_5$     |                                           |
|                                             |                 |                                          | └ 運転時間 内 -                          |                                                 | $P_6$                                               | -          | -   | -   | 0        | $C_{6}$                | $P_6 \times C_6$     | n —                                       |
|                                             | L               | 崩壊あり                                     | ┏ 運転時間 外 -                          |                                                 | P <sub>7</sub>                                      | -          | 0   | 0   | 0        | <i>C</i> <sub>7</sub>  | $P_7 \times C_7$     | $\pi_{isk} - \sum_{k=1}^{n} (n \times c)$ |
|                                             |                 |                                          | └ 運転時間 内 -                          | 被害なし                                            | P <sub>8</sub>                                      | —          | 0   | 0   | 0        | $C_8$                  | $P_8 \times C_8$     | $Z(P_i \land U_i)$                        |
|                                             |                 |                                          |                                     | 被害あり                                            | $P_9$                                               | 0          | 0   | 0   | 0        | $C_9$                  | $P_7 \times C_8$     |                                           |
|                                             | 中止規制            | 崩壊なし                                     | ┏ 運転時間 外 -                          |                                                 | P <sub>10</sub>                                     | -          | ١   | ١   | ١        | C <sub>10</sub>        | $P_8 \times C_9$     |                                           |
|                                             |                 |                                          | └ 運転時間 内 -                          |                                                 | P <sub>11</sub>                                     | —          | ١   | ١   | 0        | C <sub>11</sub>        | $P_7 \times C_9$     |                                           |
|                                             | L               | 崩壊あり                                     | 運転時間 外                              |                                                 | P <sub>12</sub>                                     | _          | 0   | 0   | 0        | <i>C</i> <sub>12</sub> | $P_8 \times C_{10}$  |                                           |
|                                             |                 |                                          | 運転時間内                               |                                                 | P <sub>13</sub>                                     | _          | 0   | 0   | 0        | <i>C</i> <sub>13</sub> | $P_7 \times C_{10}$  |                                           |

図-10 リスク計算に必要な算出項目の関係

Sを盛土の場合の定数(m=n=0.3)により求める ことで年間降雨頻度期待値分布を作成した。上記 1)により作成した年間降雨頻度分布を図-8%に 示す。なお、この図では時間雨量20mm以下、連 続雨量50mm以下、年間降雨頻度0.2回以下の範囲 を示した。

上記2)で条件付き累積降雨頻度分布を作成し、 上記3)でこれを関数式で近似した理由は、図-8 に示したように年間降雨頻度分布が、降雨量の多 い領域において頻度のばらつきが大きく、これを 直接近似すると精度が低くなったためである。

条件付き累積頻度分布を近似する関数式として は、3つの近似関数型について近似精度を検証し た結果、以下に示す対数正規型の関数式を用いる。 この関数式は、既存の2次元確率分布から基準化 条件等を除外した関数型を参考にして設定してい る。

$$f_1(r,R) = \frac{A}{2\pi a b \sqrt{1-c^2} r R} \exp \left[\frac{-1}{2(1-c^2)} \left\{ \left(\frac{\ln r - d}{a}\right)^2 \right\} \right]$$

$$-2c\left(\frac{\ln r - d}{a}\right)\left(\frac{\ln R - e}{b}\right) + \left(\frac{\ln R - e}{b}\right)^{2} \right\}$$
(4)

ここで、*A、a、b、c、d、e*:係数

図-8から作成した条件付き累積降雨頻度分布 を式(4)で示した関数型で近似し、この結果から作 成した年間降雨頻度期待値の分布を図-9<sup>8</sup>に示 す。年間降雨頻度分布(図-8、ここでは近似前 という)とこれをもとに作成した年間降雨頻度期 待値分布(図-9、ここでは近似後という)を時 間雨量、連続雨量とも1mmの単位で離散化し、離 散化した時間雨量、連続雨量に対応するそれぞれ の年間降雨頻度について、近似前と近似後の差を 求めて相関係数を算出すると0.96であった。また、 離散化した時間雨量、連続雨量に対応するそれぞ れの年間降雨頻度を近似前と近似後ごとにすべて 足しあわせることで求められる総頻度は、近似前 が76.7(回/年)、近似後が70.0(回/年)であった。

図-9 を用いることで、連続雨量 *R*、時間雨量 *r*に応じた年間降雨頻度期待値を算出することが できる。

#### 5. リスクの算出

(1) 損失項目の設定とリスク算出方法

降雨時に想定される事象が生じたときの損失を 算出するためには、損失項目を決定する必要があ る。これらは、対象とする箇所により異なること が想定される。このため、実際に本研究を適用す る場合には、線路の見通し距離、列車速度、一列 車あたりの乗車人員等の線区の特性を考慮して、 斜面ごとに損失項目を設定することとなる。

ここでは、一例として、損失項目を1)車両等被 害額、2)斜面崩壊時の応急費(必要により列車を 運行させるために必要な線路および電気設備の復 旧費用を含む)、3)斜面崩壊時の復旧費、4)営業損 失、の4項目とし、降雨時に想定される各事象に 該当する損失項目を表-2に示した。なお、営業 損失は、斜面崩壊が発生した場合と斜面は崩壊し ていないが列車の運行を規制した場合とでは費用 が異なる。

上記で示した損失項目のうち、斜面崩壊時の応 急費、復旧費、営業損失費については崩壊の規模 によって異なり、筆者らが既に提案した崩壊規模 の予測手法<sup>90</sup>を用いて、規模に応じた被害額を設 定する。

以上の結果をまとめ、式(1)、式(2)に沿って降雨 時リスクを算出するために必要な項目を整理した 結果を図-10に示す。この図に示すとおり、降雨時に想定される各事象の発生頻度期待値と損失とから斜面の降雨時リスクが計算できる。

(2) 現状リスクの計算事例

実斜面でのリスク計算は上記で示した方法で実 行するが、ここでは、計算事例を理解しやすいよ うに、便宜的に斜面の耐雨性(限界雨量)と降雨 および運転規制の規制値を表-3のように設定し て降雨時斜面リスクを計算した事例について述べ る。

表に示すとおり、他の盛土と比較して盛土cの限 界雨量は小さいが、盛土aと盛土bは降雨が多い地 域(ここでは、熊本のアメダス地点データを利用) に、盛土cはこれよりも降雨が少ない地域(ここで は、東京のアメダス地点データを利用)に存在す ると仮定した。

また、中止規制値は降雨頻度期待値分布を作成 した際のアメダス地点データ(1976年~2007年の 32年間)をもとに時間雨量、連続雨量それぞれの 確率雨量を求め、盛土a、盛土cは時間雨量、連続 雨量とも約3年の確率雨量を、盛土bは約2年の確 率雨量とした。そして、徐行規制値は中止規制値 の75%とした。

運転時間内外別確率は、対象斜面付近の降雨出 現時間帯と関係があるが、本研究では計算を簡便 にするために、時間雨量r、連続雨量Rのある降雨 が24時間の中でどの時間にも発生する可能性が あるものと仮定したうえで、対象斜面を通過する 列車の1日における運転時間割合のみで設定した。 具体的には、運転時間内を0.75(1日のうち18時 間が運転時間)、運転時間外を0.25とした。また、 車両等被害の有無別発生確率は、ここではリスク が大きく計算される結果となるように、規制なし の場合には被害ありを1、被害なしを0とし、徐行 規制の場合には被害ありを0.2、被害なしを0.8と した。

計算事例における損失算出の考え方を表-4に、 想定した営業収益や崩壊土量とこの考え方に基づ き設定した損失を表-5に示す。

以上の条件で、各盛土の現状リスクを算出した 結果を図-11に示す。この図より、盛土bのリス クが大きいことが定量的にわかる。すなわち、表 -3、表-5に示した条件のみでは防災対策の優先 順位を判断することは困難であるが、図-11に示 したように降雨時リスクを算出し比較することで、 対策の順位を決定する際の参考になると考える。

(3) 対策後リスクの算出結果

崩壊の危険度が高い盛土や切土に対して防護設 備(ハード対策)を施工する場合、盛土や切土は

| 表-3 | 設定した斜面の耐雨性(限界雨量)と降雨( | P |
|-----|----------------------|---|
|     | メダス地点)および運転規制の規制値    |   |

|        | 盛土名称       | 盛土a  | 盛土b          | 盛土c          |
|--------|------------|------|--------------|--------------|
|        | 耐雨性        | 大    | <del>П</del> | 小            |
|        | 限界雨量       | 18.5 | 17.0         | 14.5         |
|        | 降雨         | 多    | 多            | <del>П</del> |
| アメダス地点 |            | 熊本   | 熊本           | 東京           |
| 中止     | 連続雨量(mm)   | 260  | 210          | 150          |
| 規制値    | 時間雨量(mm/h) | 50   | 45           | 40           |
| 徐行     | 連続雨量(mm)   | 195  | 160          | 115          |
| 規制値    | 時間雨量(mm/h) | 40   | 35           | 30           |

表-4 損失算出の考え方

| 応急費                 | 崩壊土量×10万円/m <sup>3</sup>     |
|---------------------|------------------------------|
| 復旧費                 | 崩壊面積×1.5×10万円/m <sup>2</sup> |
| 応急時間                | 崩壊土量×0.2時間/m <sup>3</sup>    |
| 応急日数                | 応急時間/24時間を整数に繰り上げ            |
| 崩壊時の営業損失<br>(営業時間外) | 営業収益(万円/日)×応急日数              |
| 崩壊時の営業損失<br>(営業時間内) | 営業収益(万円/日)×(応急日数+0.5日)       |
| 運転中止時の<br>営業損失      | 営業収益(万円/時間)×5時間              |
| 運転徐行時の<br>営業損失      | 営業収益(万円/時間)×1時間              |
| 車両等被害額<br>(規制なしの場合) | 営業収益の30日分<br>(徐行時は上記の2割)     |

表-5 設定した損失

| 盛土名称                    | 盛土a   | 盛土b  | 盛土c  |
|-------------------------|-------|------|------|
| 営業収益(万円/日)              | 450   | 200  | 45   |
| 営業収益(万円/時間)             | 25    | 11   | 2.5  |
| 崩壊規模                    | 小     | 日    | 大    |
| 崩壊土量(m <sup>3</sup> )   | 100   | 200  | 500  |
| 崩壊面積(m <sup>2</sup> )   | 200   | 270  | 330  |
| 応急費(万円)                 | 1000  | 2000 | 5000 |
| 復旧費(万円)                 | 3000  | 4050 | 4950 |
| 崩壊時の営業損失<br>(営業時間外)     | 450   | 400  | 225  |
| 崩壊時の営業損失<br>(営業時間内)     | 675   | 500  | 248  |
| 運転中止時の<br>営業損失          | 125   | 56   | 13   |
| 運転徐行時の<br>営業損失          | 25    | 11   | 2.5  |
| 車両等被害額(万円)<br>(規制なしの場合) | 13500 | 6000 | 1350 |



鉄道事業者の管理用地内であるため、崩壊を生じ させないようにのり面防護工などの発生源対策を 講じることが基本となる。そこで、盛土ののり面 防護工としてプレキャスト格子枠工を施工した場 合のリスク(以下、対策後リスクという)を算出 し、現状のリスクと比較することで対策の効果を 定量化することを試みる。

対策後のリスクを算出するために必要な条件を 表-6に示す。対策後の事象ごとの年間発生頻度 期待値を算出する条件は、表-3で示した条件の うち、限界雨量の値のみ異なる。盛土にのり面防 護工を施工した場合は限界雨量が増加し、図-4 の限界雨量曲線の例に示したとおり無防護と比較 して右上に限界雨量曲線が描かれる、すなわち、 耐雨性が向上する。ここで、ハード対策としてプ レキャスト格子枠工を施工しても耐雨性が無限大 となるのではなく、表-1に示した効果点のみ耐 雨性が向上するものとした。したがって、防護工 施工後の限界雨量を超える降雨があれば崩壊する ことになる。

事前対策費(プレキャスト格子枠工の施工費) については、表-4 に示した復旧費の算出の考え 方に準じ、崩壊面積の3倍の範囲対策を行うもの と仮定して算出した。対策後の盛土が崩壊したと きの応急費は、現状よりも対策工を除去する分だ け多くかかると想定して現状の応急費の1.5倍と し、復旧費は事前対策費と同じだけかかるものと 想定して設定した。その他の損失条件は表-4 で 示した現状リスクの算出条件と同じとした。

上記の条件で盛土ごとに対策後リスクを算出し、 現状のリスク Risk と対策後のリスク R'isk および これらを比較することで算出したリスクの低減量  $\Delta R_{isk}$  (= $R_{isk}$ - $R'_{isk}$ ) を図-12に示す。さらに、 リスクが経年とともに累積されるものとし、図ー 13に示すとおり、現状および対策後の累積リスク を算出した。対策後の累積リスクは事前対策費を 損失と考え初期値に加算した。そして、図に示す とおり、現状よりも対策後の累積リスクが下回る ことになる年数を投資効果発生年数 Tと定義し、 リスク低減量以外に対策の効果を把握する指標と した。投資効果発生年数 Tは事前対策費 Wをリ スク低減量 $\Delta R_{isk}$ で除す( $T = W \Delta R_{isk}$ )ことによ り求められ、算出結果を表-7 に示した。投資効 果発生年数 Tは、上記式より事前対策費に対して リスク低減量が大きい、つまり対策の効果が高い ほど小さくなる。

図-12 よりどの盛土に対してものり面防護工 を講じることでリスクを大きく低減できること、 表-7より投資効果発生年数も5.1年~7.3年と比 較的小さいことから、対策の効果が高いことがわ

#### 表-6 対策後リスクの計算条件

| 盛土名称       | 盛土a        | 盛土b   | 盛土c   |  |  |
|------------|------------|-------|-------|--|--|
| 事前対策種別     | プレキャスト格子枠  |       |       |  |  |
| 限界雨量の効果点   | 4.26       |       |       |  |  |
| 事前対策後の限界雨量 | 22.76      | 21.26 | 18.76 |  |  |
| 事前対策費の考え方  | 崩壊面積の3倍とする |       |       |  |  |
| 事前対策費(万円)  | 6000       | 8100  | 9900  |  |  |





図-13 投資効果発生年数の定義

表-7 投資効果発生年数の計算結果

| 盛土名称        | 盛土a | 盛土b | 盛土c |
|-------------|-----|-----|-----|
| 投資効果発生年数(年) | 7.3 | 5.1 | 5.4 |

かる。このように、表-6のみではのり面防護工 による対策の効果を把握することは困難であるが、 図-12、表-7に示したように現状のリスクと対 策後のリスクを比較することで、対策の効果を定 量的に把握することが可能となる。この結果は、 のり面防護工による対策を実施すべきかどうかの 定量的な判断の際に参考になると考える。

#### 6. おわりに

本稿では、鉄道沿線で降雨により発生する斜面 災害の危険性をリスクとして評価する方法につい て述べるとともに、計算事例をもとにリスク評価 結果の利用方法を示した。鉄道沿線では落石など の災害も発生することから、こうした災害の危険 性をリスクとして評価する方法についても検討し ていく予定である。

#### 【参考文献】

1) 村上温、野口達雄監修(1998):鉄道土木構造物の維持管理、日本鉄道施設協会、pp.672

2) Benjamin, J. R. and Cornell, A. A. (1970) : Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill, pp.578-580

3) 布川修、杉山友康、森泰樹、畑明仁(2011): 鉄道沿線斜面の降雨時リスク評価に基づく防災対 策の意思決定方法、土木学会論文集 C(地圏工学)、 Vol.67、No.1、pp.160-173

4) 岡田勝也、杉山友康、村石尚、野口達雄 (1992):統計的手法による鉄道盛土の降雨災害危 険度の評価手法、土木学会論文集、No.448/III-19、 pp.25-34

5) Okada, K., Sugiyama, T., Muraishi, H.,

Noguchi, T. and Samizo, M. (1994): Statistical risk estimating method for rainfall on surface collapse of a cut slope, *Soils and Foundations*, Vol.34, No.3, pp.49-58

6) Sugiyama, T., Okada, K., Muraishi, H., Noguchi, T. and Samizo, M. (1995): Statistical rainfall risk estimating method for a deep collapse of a cut slope, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.4, pp.37-48

7) 杉山友康、岡田勝也、秋山保行、村石尚、奈 良利孝(2000):鉄道盛土の限界雨量に及ぼす防護 工の効果、土木学会論文集、No.644/IV-46、 pp.161-171

8) 布川修、杉山友康、太田直之、畑明仁、堀倫 裕、亀村勝美、岡田勝也(2010):鉄道の降雨時運 転規制を考慮した斜面崩壊の発生頻度期待値算出 方法、土木学会論文集 C、Vol.66、No.1、pp.78-88 9) 布川修、杉山友康、森泰樹、太田直之、岡田 勝也(2009):統計的手法による鉄道盛土と切土の 降雨による崩壊土量の概略予測手法、土木学会論 文集 C、Vol.65、No.3、pp.728-744

#### 道路斜面のリスク評価事例

A case of risk valuation for road-slope 応用地質(株) 杉田 理、中川 渉\* Satoshi SUGITA、Wataru NAKAGAWA(OYO Corporation) キーワード:崩壊発生確率、危険度ランク、リスク Keywords:collapse probability、risk rank、risk

#### 1. はじめに

のり面・斜面に近接する道路は、落石・崩壊等 の斜面災害が発生する危険性(ハザード)が存在 する。道路の斜面災害には、多種多様な災害因子 が内在しており、一概にどのような危険性がある かどうかを定義することは困難である。そこで現 象と危険性を評価するためにリスクの概念を用い て道路ならびに道路のり面・斜面の評価を行なっ た事例を紹介する。

道路災害という現象を定量的にリスクとして評価するには、該当路線の斜面災害についてそのハ ザードを定量的かつ統一的に定義し、予測評価す る必要がある。今回の検討では、ハザードを道路 に近接したのり面、斜面が崩壊することで、道路 上に災害が発生する確率とその想定災害規模との 関係と定義した。

#### 2. 検討の概要

検討対象となる地域は、H県北部のI市、M市、 N町、T町である。この地域はH県の北部からT 山地にあり、地形的に南部の平野部と北部の山地 に区分できる。また対象となる路線は、国道5路 線、主要地方道8路線、一般府道23路線であり、 総延長は、約200kmに及ぶ(図1参照)。

これらのうち山岳部を通過する路線は、斜面が 連続し、落石や崩壊または土石流による道路災害 の危険性が潜在する。また防止設備についても昭 和 40 年代の構造物が老朽化して危険な状態にあ り、平成 8 年度の防災点検において「要対策」箇 所が多数指摘されている。しかし国及び府の道路 維持・管理予算は、年々減少するとともに変状斜 面・のり面を早急に対策することは難しく、防災 対策を進める一方、毎年のパトロールにより危険 箇所の状況を監視することで対応している。

上記案件について防災対策を有効に進めるため には、要対策箇所の優先順位を評価し、管理・対 策方針を決めることが重要となる。



図1 検討道路平面図

維持管理面から優先度を評価するには、種々の 要素を考慮する必要がある。優先度を判断する上 では、斜面の「崩壊発生確率」崩壊によって生じ る「災害の規模」、「災害による損失」などを考慮 する必要があり、まさにリスク評価手法が適用で きる。

リスク算定における基本データは「崩壊発生確 率」であり、過去の災害履歴などから統計的に算 定することができる。ただしこの災害履歴につい ては、自動車専用道路など管理機関がある道路で は資料が残されているが、地方道では記録の保管 期限などの関係で古い記録はほとんどない状況で ある。

一方「災害の規模」、「災害による損失」は、土 砂が道路に落ちてきた結果以降の状態を想定する ためであることから、現地状況、交通状況、周辺 社会状況など資料の質と目的に応じて検討が可能 となる。同種における検討課題は、いかに崩壊発 生確率「崩壊発生確率」を想定するかということ である。ここでは他の地域でも汎用できるように、 資料収集、現地踏査を主体として、崩壊跡を特定 しその発生時期を推定することで「崩壊発生確率」 を求めた。

また優先度評価についても、資料調査および現 地踏査で得られる情報を基本データとし、交通セ ンサスデータ等入手可能な資料の範囲でリスク評 価を試行した。

#### 3. リスクを考慮した比較

図2にリスク評価の流れを示した。



図2 道路リスク検討の流れ

3.1 斜面の現況および危険度ランク判定

調査対象とした路線における斜面災害発生源の 形態は以下のものが認められる。

- ①自然斜面
- ② 切土砂面
- ③ 盛土斜面
- ④ 土石流

危険度ランクについては、災害を引き起こすか どうかを基準とし、表1に準じて評価した。

ここで言う路線の優先順位とは効率的かつ効果 的な維持管理を行うため、どの路線対策が優先さ れるかを評価するものである。しかしこの評価に ついては、道路斜面災害が及ぼすどのような影響 側面を捉えるかで考え方が異ってくる。

○災害が未発生の状態

(斜面の現況を評価する)

- 危険箇所の有無
- ・崩壊の可能性

○直接的な外部被害

・人身被害

・直接的な道路被害

```
表1 危険度評価ランク表
```

| ランク   | 現 象 説 明                                                                                         |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ランク I | 現状で崩壊・落石が継続的に発生し、あるいは不安定性を示す<br>進行性の現象がある状況。<br>崩壊すると落石・土砂が道路に達する。                              |
| ランクⅡ  | 不安定岩塊(岩盤)が存在あるいは不安定性を示す現象があ<br>る。<br>崩壊すると「1次崩壊では災害とならない」もの、あるいは「規模<br>が小さく土砂が道路に達しても災害にならない」もの |
| ランクⅢ  | 現状で災害に結びつく現象、要因がない。<br>崩壊を繰り返しても土砂が道路に達しない。                                                     |
|       | (維持補修の視点)                                                                                       |
|       | 道路設備被害⇔修繕工事                                                                                     |
|       | 崩壊斜面復旧⇔対策工事費                                                                                    |
|       | ・間接的な被害(支援の視点)                                                                                  |

间接的な被害(又近 迂回損失 人身損失 物資損失

このような事項を個々の斜面において総合的に 検討し、比較することは「各事項の評価を定量化 する」ことであり、いわゆるリスクマネージメン トの手法となる。

#### 3.2 危険度ランクの箇所数による評価

危険度ランクによる箇所数の評価は、既存資料・現地調査他の要素を加味し①各路線別の危険 箇所数、②重み付け係数による評価点、③路線延 長を考慮した評価点、④影響を受ける事象を考慮 した評価点の準に実施した。

危険箇所別の評価事例を表2に示した。ここで 仮にランク別に重み付けを行なうと各路線の重み 付けが評価できる。

#### 重み付け評価点=箇所数×重み付け係数

表2 路線別の重み付け評価例

|     | ランクI | ランクⅡ | ランクエ | 路線延長(km) | 重み付け評価点 |
|-----|------|------|------|----------|---------|
| 路線A | 3    | 4    | 12   | 7        | 10      |
| 路線B | 1    | 6    | 18   | 3        | 8       |
| 路線C | 1    | 3    | 11   | 4        | 5       |

路線延長を考慮すると、同ランクの斜面個数が ある場合結果は同じであるが、路線延長が長いほ ど安全区間が長くなる。すなわち「斜面災害に遭 遇する可能性」が小さくなる。その結果を表3に 示した。

| 表 3 路   | 線別の単位                                                  | 延長評価点                                                            | 〔例                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 重み付け評価点 | 路線総延長(km)                                              | 通過時間(分)                                                          | 単位延長評価点                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 10      | 7                                                      | 7                                                                | 12.90                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 8       | 3                                                      | 5                                                                | 13.35                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 5       | 4                                                      | 4                                                                | 5.00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|         | → 安全                                                   | <b>100 3</b>                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|         |                                                        | <b>危険</b>                                                        | 安全                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|         | 表 3 路<br><b>重み付け評価点</b><br>10<br>8<br>5<br>5<br>6<br>6 | 表3 路線別の単位3<br>重み付け評価点路線総延長(km)<br>10 7<br>8 3<br>5 4<br>安全<br>安全 | 本 3 路線別の単位延長評価点 <u>重み付け評価点路線総延長(km)) 通過時間(分)</u> <u>10 7 7     8 3 5     5 4 4     4      <i>φ</i> φ± <i>φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ φ</i> </u> |

また同程度の危険度の斜面が2つの路線にあっ た場合、斜面が崩壊したときに影響を受ける事項 の大きさで評価する必要が生じる。それは通行量 が大きい道路ほど影響は大きいことを示す。

交通センサスの通行台数を参考とすると、

#### 影響車両評価点=単位延長評価点×通行台数

としてもとめることができ、これは「土砂災害に よる被害(損失)の大きさ」を考慮することにな る。

表4 路線別の影響車両数評価点例

|     | 重み付け評価点 | 路線総延長(km) | 単位延長評価点 | 通行台数 | 影響車両数評価点 |
|-----|---------|-----------|---------|------|----------|
| 路線A | 10      | 1         | 12.90   | 1500 | 19350    |
| 路線B | 8       | 3         | 13.35   | 800  | 10680    |
| 路線C | 5       | 4         | 5.00    | 2300 | 11500    |

以上のように危険箇所数を基本とした比較をす ることにより、各段階による重み付け評価点は「斜 面崩壊が起きる確率」単位延長評価点は「斜面崩 壊に遭遇する確率」、影響車両評価点は「土砂災害 による被害(損失)の大きさ」を反映するもので ある。すなわちこれらを相乗すると簡易なリスク 評価になっているものと考えられる。

これらの結果を総括し整理すると表5のように 整理できる。各項目によってA423、A173、S43、 S4等の値が高く、これらの路線について危険度が 高いと評価することができる。

#### 4. リスクを考慮した評価

これまでの検討を基に、抽出された路線の中か ら危険箇所の数が多い A423、S43 をもとにリス クを考慮した比較を試みる。

4.1 斜面崩壊が起きる確率(年超過確率)

リスクを求めるためには災害が発生する確率を 求める必要がある。斜面災害の場合、統計的手法 として災害履歴を調べることで崩壊時期と崩壊規 模の関係から計算により年超過確率を求めること

#### 表5 各路線別の影響車両数評価

| 路線名           | 区間距離   | 道路交通センサス<br>自動車類(12時間)。) | 危険箇所数集計<br>(判定ランクによる) |          | 危険度重み付け<br>箇所数 × 係数 |          |    |   | 危険度/区<br>問距離km b) | a) × b)/1000    |       |
|---------------|--------|--------------------------|-----------------------|----------|---------------------|----------|----|---|-------------------|-----------------|-------|
|               | (KIII/ | 口刷牛鸡(12时间/8/             | I                     | Π        | Π                   | 2        | 1  | 0 | 승計                | IN HE MERTIN D/ |       |
| A173 문        | 16.9   | 7454                     | •                     | -        |                     | -        |    | Ů | ын                |                 |       |
| 71170 - 9     | 3.8    | 7454                     | 0                     | 1        | 8                   | 0        | 1  | 0 | 1                 | 0.26            | 1.97  |
|               | 13.1   | 7454                     | 0                     | 14       | 21                  | 0        | 14 | 0 | 14                | 1.07            | 7.95  |
| A423 뭄        | 15.8   | 7110                     | -                     |          |                     | _        |    | - |                   |                 |       |
|               | 11.6   | 7110                     | 6                     | 14       | 45                  | 12       | 14 | 0 | 26                | 2.24            | 15.94 |
|               | 1.6    | 7110                     | 0                     | 2        | 3                   | 0        | 2  | 0 | 2                 | 1.25            | 8.89  |
|               | 2.6    | 7110                     | 0                     | 2        | 7                   | 0        | 2  | 0 | 2                 | 0.77            | 5.47  |
| A477 号        | 3.8    | 4439                     | 0                     | 3        | 9                   | 0        | 3  | 0 | 3                 | 0.79            | 3.50  |
|               | 7.5    | 2478                     |                       |          |                     |          |    |   |                   |                 |       |
|               | 1.5    | 2478                     | 0                     | 0        | 1                   | 0        | 0  | 0 | 0                 | 0.00            | 0.00  |
|               | 3.0    | 2478                     | 0                     | 0        | 1                   | 0        | 0  | 0 | 0                 | 0.00            | 0.00  |
|               | 2.0    | 2478                     | 0                     | 0        | 3                   | 0        | 0  | 0 | 0                 | 0.00            | 0.00  |
| S 4 号         | 21.7   |                          |                       |          |                     |          |    |   |                   |                 |       |
|               | 3.8    | 2471                     | 2                     | 5        | 15                  | 4        | 5  | 0 | 9                 | 2.37            | 5.85  |
|               | 8.0    | 2325                     | 5                     | 13       | 34                  | 10       | 13 | 0 | 23                | 2.88            | 6.68  |
|               | 4.5    | 2464                     | 2                     | 10       | 11                  | 4        | 10 | 0 | 14                | 3.11            | 7.67  |
|               | 4.2    | 3245                     | 0                     | 0        | 7                   | 0        | 0  | 0 | 0                 | 0.00            | 0.00  |
| S 43 号        | 20.0   |                          |                       |          |                     |          |    |   |                   |                 |       |
|               | 6.0    | 1873                     | 7                     | 14       | 21                  | 14       | 14 | 0 | 28                | 4.67            | 8.74  |
|               | 1.9    | 2471                     | 0                     | 4        | 14                  | 0        | 4  | 0 | 4                 | 2.11            | 5.20  |
| S54 号         | 6.8    |                          |                       |          |                     |          |    |   |                   |                 |       |
|               | 5.3    | 3391                     | 0                     | 3        | 11                  | 0        | 3  | 0 | 3                 | 0.57            | 1.92  |
| F104 号        | 3.8    | 3730                     | 0                     | 1        | 7                   | 0        | 1  | 0 | 1                 | 0.26            | 0.98  |
|               |        |                          |                       |          |                     |          |    |   |                   |                 |       |
| F106 号        | 7.6    |                          |                       |          |                     |          |    |   |                   |                 |       |
|               | 2.2    | 3730                     | 2                     | 1        | 11                  | 4        | 1  | 0 | 5                 | 2.27            | 8.48  |
|               | 2.3    | 3730                     | 0                     | 1        | 5                   | 0        | 1  | 0 | 1                 | 0.43            | 1.62  |
|               | 3.1    | 3730                     | 1                     | 3        | 14                  | 2        | 3  | 0 | 5                 | 1.61            | 6.02  |
| <u>F109 号</u> | 3.9    | 1296                     | 0                     | 4        | 16                  | 0        | 4  | 0 | 4                 | 1.03            | 1.33  |
| F110 号        | 2.9    | 2440                     | 0                     | 6        | 7                   | 0        | 6  | 0 | 6                 | 2.07            | 5.05  |
| F601 号        | 2.8    | (000                     | 2                     | 9        | 0                   | 4        | 9  | 0 | 13                | 4.64            | 0.00  |
| 1002 号        | 3.9    | 1622                     | 1                     | 4        | 4                   | 2        | 4  | 0 | 6                 | 1.54            | 2.50  |
| F603 号        | 2.9    | ( 107                    |                       | <u> </u> |                     |          |    |   |                   | 1.00            | 4.40  |
| 5700 B        | 2.9    | 1407                     | 1                     | 1        | 6                   | 2        | 1  | 0 | 3                 | 1.03            | 1.46  |
| ►/32 号        | 8.1    |                          |                       | -        |                     | <u> </u> | _  | _ |                   |                 |       |
|               | 4.4    | 1263                     | 2                     | 9        | 27                  | 4        | 9  | 0 | 13                | 2.95            | 3.73  |
|               | 2.5    |                          | 1                     | 8        | 27                  | 2        | 8  | 0 | 10                | 4.00            | 0.00  |

ができる。また崩壊時期と降雨量との関係がわか れば、統計的な手法により降雨量と崩壊土量の関 係を求めることができ降雨確率から年超過確率を 推定することも可能である。

しかしながら冒頭述べたように一般道路等、現 状で実用できるのは災害履歴を統計する方法であ る。しかしながら既存資料等より斜面災害の記録 を分析するとしても、入手できない状況にある。

そこで地質調査手法(既存資料収集、現地踏査、 空中写真判読等)を軸として、崩壊跡岩塊の抜け 落ち跡、崩壊土砂の堆積や落石などの崩壊現象を 抽出し、崩壊履歴を推定した。

a)既存資料収集

既存調査結果(防災点検カルテ)等について崩 壊地の記載を抽出する。また地形図からの急峻地、 崩壊地の抽出。公開空中写真から崩壊地を抽出す る。

b) 現地踏查

資料調査で判明した崩壊地についての現地を確認する。また現状発生している崩壊地および資料 調査に無い崩壊跡の調査を行い、各崩壊地について現地踏査・簡易測量による崩壊土量の推定、崩壊跡地での植生の繁茂状況(分枝他)、年輪により 経過年数の推定を行う。

表 6 対象斜面の対策と崩壊土砂量の例

| 采문    | 敗組々    | 斜面区分 | 対策工   | 災害現象  | 到達土量 | 崩壊土量 | 判定 |
|-------|--------|------|-------|-------|------|------|----|
| 181 D |        |      | 工法    |       | m3   | m3   |    |
| 001   | R001-1 | 自然斜面 | ブロック積 | 崩壊    | 300  | 600  | A  |
| 002   | R001-1 | 切土   | ブロック積 | 落石·崩壊 | 1    | 5    | В  |
| 003   | R001-1 | 自然斜面 |       |       | 0    | 0    | С  |
| 004   | R001-1 | 自然斜面 |       |       | 0    | 0    | С  |
| 005   | R001-1 | 自然斜面 |       |       | 0    | 0    | С  |
| 006   | R001-1 | 切土   | 落石防止柵 | 落石    | 0.5  | 2    | В  |

#### c) 空中写真

現地で確認された崩壊について撮影年代の異な る空中写真を用いて崩壊時期を絞り込む。 記録のない崩壊跡地の崩壊発生時期の推定方法

I)小規模な崩壊(崩壊土量 10m<sup>3</sup>以下)

調査時点で崩壊土砂や落石の見られる場合が あり、その発生源となった斜面の植生(主に草 本類)のつき方により1年未満~数年前などの 判断を行なう。

小規模なものはその後の降雨等で侵食されて 見分けがつかないようになっている場合が多い。



図4 過去の空中写真 (左:1969年撮影 右:1974年撮影)

Ⅱ)中規模な崩壊(崩壊土量 100m<sup>3</sup>以下) 崩壊後の植生(主として木本類)の分布や成 長の程度から「何年前に成長したらしい」とい うことで推定する。

また対策工が施工された箇所では、対策工の 施工年代より崩壊時期を知る。

Ⅲ) 大規模な崩壊(崩壊土量 100m<sup>3</sup>以上)

道路に面しているばあいは対策工の施工年次 から推定される場合が多い。また年代の異なる 空中写真を比較することにより崩壊時期を推定 する。

これらの結果から崩壊時期の推定される崩壊跡 は 26 箇所あり、最も古いと推定される崩壊地は 概ね 40 年前であった。この統計結果をみると確 認できた崩壊発生時期は、最近 10 ヵ年に多く、 崩壊土量が大きいものほど推定される崩壊年代は 古い傾向がある。そこでデータの連続性を考慮し て 20年前までのデータを採用し 20 のデータで評 価した。

ある斜面の崩壊土量が推定できた場合、その崩 壊が生じる確率は図5の年超過確率のリスクカー ブに当てはめることで求めることができる。 4.2 損失(被害の想定)

損失については、災害が起きる前からおきた後 まで種々の条件があるが、本業務としてはリスク

の試算として、土砂が道路に達する場合に起きる 被害のうち通行車両(人)が受ける影響とした。

これには直接被害と間接被害がある。

直接被害は、土砂が道路に達した瞬間に通行車 (人) が直撃を受けるか、あるいは停止できずに 突っ込んでしまう場合となり、条件の設定が比較 的容易である。

一方間接被害は、その路線を通行する車両が一 時通行止め、片側通行、全面通行止め(迂回)等 の影響を受けるものである。

|     | N 207  |                     |     |
|-----|--------|---------------------|-----|
| 順位  | 年超過確率  | 崩壊土量                | n年前 |
| i   |        | W (m <sup>3</sup> ) |     |
| 1   | 0.0250 | 450                 | 1.5 |
| 2   | 0.0750 | 360                 | 10  |
| 3   | 0.1250 | 300                 | 5   |
| 4   | 0.1750 | 200                 | 12  |
| 5   | 0.2250 | 100                 | 3   |
| 6   | 0.2750 | 75                  | 7.5 |
| 7   | 0.3250 | 51                  | 2 0 |
| 8   | 0.3750 | 3 5                 | 2   |
| 9   | 0.4250 | 2 5                 | 4   |
| 10  | 0.4750 | 2 5                 | 7   |
| 11  | 0.5250 | 16                  | 5.5 |
| 12  | 0.5750 | 10                  | 2.5 |
| 13  | 0.6250 | 7.5                 | 7   |
| 14  | 0.6750 | 6.4                 | 5   |
| 15  | 0.7250 | 4.5                 | 10  |
| 16  | 0.7750 | 3.2                 | 3   |
| 17  | 0.8250 | 1                   | 1   |
| 18  | 0.8750 | 0.8                 | 1   |
| 19  | 0.9250 | 0.5                 | 1   |
| 2 0 | 0.9750 | 0.3                 | 1   |

崩壊土量と年超過確率の関係 表 7



図5 崩壊土砂量と年超過確率の関係

4.2.1 道路に到達する土砂の想定

崩壊土砂は、全てが道路に達するのではなく、 対策工等の効果や地形条件により到達土量が異な る。また道路構造に応じて、道路のどこまで(路 肩、片車線、両車線)広がるかも異なる。これは 通行者が影響を受ける可能性を検討するものであ り、崩壊が予想される各斜面において個々に判断 する必要がある。

ここでは、到達は範囲について次のような区分 を設定した(図6参照)。

- ・歩道、側溝:主として歩行者(片側車線分)
- 斜面側路肩:歩行者、自転車、自動二輪車
- 片側車線 :上記+自動車類(片側車線分)
- :上記+自動車類(反対側車線分) ・両側車線
- :上記+歩行者、自転車、自動二 · 道路全面 輪車



図6崩壊土量と通行車両の位置関係

4.2.2 損失の想定

道路斜面災害における直接被害として、損害額 算定の基礎となる通行車数についての検討を示す。 通行車数、歩行者数は交通センサスデータを利用 し、常時均一に通行すると仮定する。交通事情に よって異なるが、現状は以下の乗車人員とする。

| ・歩行者、自転車、自動二 | 輪 1人/台 |
|--------------|--------|
| ・乗用車         | 2 人/台  |
| ・トラック、貨物自動車  | 1人/台   |
| ・バス          | 20 人/台 |

4.2.3 直接損失を考慮した路線比較

確率ならびに損失の数値を掛け合わせ、評価点 を算出することは簡易なリスク評価となっている。 そこでここまで検討した確立と損失を用いてリス クを考慮した路線の比較を試みた。対象となるの は A423 号と S43 号である。

1) リスクを評価点として表す場合

斜面毎の評価点算出

崩壊が予想される危険度ランク I の斜面につい て、個々の斜面状況に応じて崩壊確率と道路への 到達土量を検討し、評価点を算出した。

評価点 $S_n = r_n \times D_1$ または $S = r_n \times D_2$ 

r <sub>n</sub>:斜面の崩壊確率

D<sub>1</sub>:片側車線通行確率

D<sub>2</sub>:車種別の通行台数×乗車人員

② 路線毎の評価点の集計

斜面毎の評価点は、各斜面における崩壊確率と 影響を受ける通行台数(または人数)から算出さ れている。そこで路線沿いにある斜面の評価点 Sn を集計すると、その路線の「総合評価点」となる。

#### $S = \Sigma S n$

#### S:総合評点

上記結果を見ると路線評価は表.(危険度ランク と箇所数)と異なることが明らかである。これは 各斜面における危険性について確率と可能性を考 慮した効果であると考えられる。確率についてみ ると崩壊規模の大きなものほど崩壊確率が小さく

| 表 | 8 | 路線別の評価点の集計 | ŀ |
|---|---|------------|---|
|   | - |            |   |

| 路線名   | 位置No. | 崩壊土量<br>(推定) | 年超過確率 | 到達土量 | 到達度   | 被害人数 | a)×b) |
|-------|-------|--------------|-------|------|-------|------|-------|
| S43号  | 12    | 7.5          | 0.20  | 7.5  | 片車線   | 1774 | 358   |
|       | 32    | 25           | 0.15  | 10   | 歩道、側溝 | 21   | 3     |
|       | 34    | 10           | 0.19  | 10   | 片車線   | 1774 | 334   |
|       | 36'   | 8            | 0.20  | 8    | 片車線   | 1774 | 353   |
|       | 36    | 20           | 0.16  | 10   | 片車線   | 1774 | 277   |
|       | 38    | 20           | 0.16  | 10   | 片車線   | 1774 | 277   |
|       | 39    | 5            | 0.22  | 5    | 片車線   | 1774 | 391   |
|       | 40    | 0.5          | 0.31  | 0.5  | 歩道、側溝 | 21   | 7     |
|       |       |              |       |      |       | 合計   | 1998  |
| A423号 | 29    | 1            | 0.29  | 1    | 歩道、側溝 | 135  | 39    |
|       | 40    | 2            | 0.26  | 1    | 路肩    | 2104 | 547   |
|       | 43    | 10           | 0.19  | 3    | 歩道、側溝 | 135  | 25    |
|       | 54    | 2            | 0.26  | 1    | 路肩    | 2104 | 547   |
|       | 54    | 50           | 0.11  | 2    | 路肩    | 2104 | 237   |
|       | 57    | 2            | 0.26  | 0.5  | 歩道、側溝 | 135  | 35    |
|       |       |              |       |      |       | 合計   | 1431  |

なるため、危険性が低くなる。例えば 1m<sup>3</sup>の崩壊 は1回/年の確率であり、400m<sup>3</sup>の場合は、1回/20 年の確率である。このため確率からみた危険性は 1m<sup>3</sup>グループのほうが高いこととなる。

ただし影響を受ける可能性について、崩壊土量 が小さいと道路への到達土量が小さく、影響する 通行台数(人数)も小さくなる。したがって確率 と影響を受ける可能性の相乗において必ずしも到 達土量が大きい斜面ほど評価点が高くなる訳では ないことになる。すなわち各斜面の危険度を評価 したことになり斜面ごとの優先度を表すものであ る。

2) リスクを具体的数値として表す場合

①通行車が崩壊により事故を生じる可能性

直接的な被害は、通行者が崩壊土砂に接触する ことで生じる。例えば時速 40km で走行していた とすると図 7 のような状況となる。つまり危険区 間(制動距離+土砂幅+車両長)のなかに位置した 車両は事故の軽微に差はあるが何らかの被害を受 ける。なおここでは歩行者、自転車他検討条件が 異なるが全て 2 秒として検討した。したがって土 砂崩壊に1 台の車両が遭遇する時間帯を 2 秒とし 仮に通行台数が1 台/日の場合には、通行車両が危 険区間にいる可能性は以下のようになる。

2 秒×1 台/(60×60(分)×24(時間))秒=2.3 ×10<sup>-5</sup>≒0.000023 台

つまり交通量が毎日1台であるならば、1箇所 の危険区間に 0.000023 台の通行者がいる可能性 を示すものとなる。これに交通センサスの通行台 数を乗じると危険区間にいる可能性となる。これ を影響人数と呼ぶ。



図7 車両が崩壊土砂に遭遇する位置関係

#### ②各斜面における被害規模

各斜面における被害規模の算定は、道路への到 達土量と通行台数を考慮することで求められる。



図8 土砂崩壊の土砂到達の考え方

③リスク算定

各斜面において生じる直接被害規模に対して崩 壊確率を乗じると具体的な被害台数、被害人数と なる。なおこれに乗じる崩壊確率は超過確率であ るため、1年当たり被害想定表値となる。

この値は斜面で独立のため、各路線別に崩壊が 予想される斜面の値を累積すると各路線あたりの 被害車両台数、被害人数となる。





図10年超過確率と影響人数の関係(平時)

図 9、図 10 は影響人数と年超過確率の関係を 示したが、このグラフの下にある面積を積分す れば、1 年当たりのリスク(影響人数)となる。 例えば 15km の路線で、対象斜面幅が 100m の斜面を想定すると1斜面あたりで算 定した結果は以下のとおりである。

平日 0.000551 人/年

休日 0.000703 人/年

っまり、斜面におけるリスクとしては最大 で 0.0007 人/年となる。

これを損害額として仮に算定するとして、 この人数が死亡人数であるとすると、日本の 場合の死亡に対する補償額を仮に約 3000~ 4000 万円/人とすると、対象のり面におけ る年間リスクは 21000 円と算定されること となる。

次に、この斜面が最も危険で、以後の崩壊 がこの斜面に集中すると仮定すると、最初に 検討した斜面長での崩壊確率平均化で 1/ 150 の発生確率とすると 1/1 の確率、つま り、路線全ての確率がこの斜面に集中すると することで求められる。したがって、平均化 して算定したリスク 21000円の 150 倍となり、 約 300 万円/年のリスクとなる。

以上より、この斜面に対するリスクは、人 身被害でみれば最大で300万円/年であると いえる。



#### 5. おわりに

今回の検討では、道路斜面リスクが、斜 面の数とともにその高さ、幅そして交通量 に影響されることが明らかである。

## 空中写真判読に基づく地すべり危険度評価手法について

Landslide risk evaluation methods based on aerial photographs 濱崎英作\*((株)アドバンテクノロジー),佐々木明彦(信州大学), 八木浩司(山形大学), 宮城豊彦(東北学院大学), 奈倉弘((株)復建技術コンサルタント),前田修吾((株)テクノ長谷) Eisaku HAMASAKI (Advantechnology Co.,Ltd.), Akihiko SASAKI (Shinnshu Univ.)

Hiroshi YAGI (Yamagata Univ.), Toyohiko MIYAGI(Touhokugakuin Univ.)

Hiroshi NAKURA (Fukken Gijutsu Consultant Co.,Ltd.),

Shugo MAEDA (TECHNO HASE Co., Ltd.)

キーワード:地すべり地形, 危険度評価, 空中写真判読, AHP, 合意度

Keywords : Landslide, Risk evaluation, Photo interpretation, AHP, Degree of agreement

#### 1. はじめに

日本地すべり学会東北支部では専門部会を作り 2001~2005年の計5ヶ年にかけて岩手県・宮城県 両県を題材とし「空中写真を用いた地すべり発生 危険度の定量的手法」を開発してきた<sup>[1]</sup>.他方, 学会本部においても,ほぼ同時期に「第三系分布 域の地すべり危険箇所調査手法に関する検討委員 会」が行われ阿賀野川中流域の地すべり危険度調 査手法について研究が進められた<sup>[2]</sup>.それらは, 共に AHP 法(階層型分析法)を用いた評価システ ムで,使う地形アイテムや,構成,表現など若干 異なるところがあるものの,いくつかの検証でほ ぼ同じような評価結果を得ている.

東北支部専門部会の最終年には宮城県全域の地 すべりブロックについて AHP の評価を試みた.こ の成果は、その後 2007 年に発生した白石市の追久 保地すべりや 2008 年岩手・宮城内陸地震で発生し た地すべりや、概ねその妥当性が検証された.一 方で、地すべりとして抽出されず検討俎上に乗ら なかったものが活動したという事実もあった.こ の検証のため、地すべり抽出を再度行い、2008 年 内陸地震を再評価し、その結果から判断される" 地震時"の評価システムの考察も行った.ここで は、基本となる研究手法、特に AHP 法の考え方を 述べると共に、これまでの事例に基づいた評価方 法の実際について紹介する.また、地形危険度評 価の問題点・将来の発展性について述べる.

#### 2. 方法

東北支部での危険度判定のアルゴリズム開発は, 主として岩手県・宮城県の約300サンプル事例を 収集して行われた. このうち作業は,委員会と専 門部会に分けブレーンストーミングを通じて実施 された.特に専門部会では,微地形要素の分類, 判読の実践,カルテ作成・記載を通じ,危険度判 定手法に関する合意形成を行いつつ AHP 法を用い て開発され,結果として客観的な定量化手法の道 筋を示すことができた.

#### 2.1 AHP 法(階層型分析法)

AHP 法は米国ピッツバーグ大学の T.L. Saaty<sup>[3]</sup> が提唱したもので、項目間の相対的な影響力の強 さを測定する手法である.決定に関連する要素を 階層構造によって把握し, 同レベルにある要素の 一対比較により各要素のウエイトを決定し、それ らに基づく総合点数によって意志決定などを支援 するシステムである.この手法は、①各要素の評 価が主観的な評価基準によるため、対立する概念 や尺度の違う要素も比較できる, ②一対比較を用 いるため評価が簡単であり、全体を通しての重要 度は「結果的に」得られる、③数量的な手法であ るため他の案と定量的に比較できる,④ある要素 の全体に及ぼす影響力や、判断の整合性が確認で きる, 等である. 図-1 に AHP の基本的な手順を示 す. AHP による地すべり危険度評価のための判読 要素としては、図-2に示すように全体地形・微地 形の明瞭度合い、地すべり境界部の状況、周辺地 形との関係および形状ポテンシャルなどである.







#### 2.2 一対比較,重み係数の決定・統合化

専門部会においては、まず各人で AHP 評価を実施し、さらにそれをたたき台として部会での AHP 重み係数案を作成した. なお、AHP の一対比較値 を以下のように設定した.

- 1: 両方の項目が同じぐらい重要
- 3: 前の項目の方が後の方より若干重要
- 5: 前の項目の方が後の方より若干重要
- 7: 前の項目の方が後の方よりかなり重要 (他 2, 4, 6, 8 を補間的に用いた)

AHP の一対比較手順と各アイテム毎の重み係数 の算定方法は多くの文献に譲るが、各カテゴリー の最終重み係数の算出に際しては、各階層で求め られた AHP の重みの積とした.最終重み係数(図 -2)は、A)~I)までの中分類アイテム中で最も高 いカテゴリーがチェックされたとき,合計 100 点 となるように補正している.なお,カルテにおい てはこれらのチェック点数の合計を AHP 点(重み 係数の合計)と称した.

#### 2.3 合意度(C)

AHP をもとに,複数の熟練者により要素間の重 み係数を決定した.また災害事例や変状のある地 すべりをもとに"合意度"の概念を用いてキャリ ブレーションを行いその重み係数の妥当性を検証 しつつ精度を高めてきた.ここで用いた合意度(C) の概念は次の通りである.すなわち,各人がアイ テムの中で全く異なるところにチェックしたとき, 合意が全く得られなかったこととなる.つまり合 意度 C=0 となる.他方,各人が全く同じ部分にチ ェックを入れた場合は C=1 となり,合意が100% 形成されたことを示す.

#### 2.4 判読カルテと判読・AHP 危険度判定の流れ

作業の流れは図-3のフローに示すように,全体 像のイメージから最初に直感点を付けて,その後 にAHPのチェックを行うようになっている.図-4 にカルテフォームを示す.カルテフォームは基本 的にA-Hまでの各アイテムに対し判読者がチェッ クを入れてAHP点を出すが,このカルテフォーム の特徴としてより危険性の高い要因を左側に,よ り低い要因を右側へ配置することで全体の評価構 成をわかり易くしている.配点の重みから移動体 表面の亀裂の新鮮さや先端地形の勾配とその発生 場の条件(攻撃斜面か否か)が重要指標となって いるのがわかる.直感の為の判断の目安を助ける ために図-5 のような地すべり地形の変化過程を 作って判定の補助としている.



| 実体視空中写真 及び 微地形判読図 (撮影年次. 写真番号 . 綿尺 1 : ) |                    |                                         |                            | イン                           | デックスによる              | 評価チェックリスト                              |                    |                    |                          |                                           |                                |  |  |  |
|------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|--|--|--|
| (図幅名:                                    | 地すべり               | 地形の                                     | ステージ                       |                              | 危険度                  | $\ddot{a} \leftrightarrow \Phi$        | 位 ↔                | · 低                | 点数                       | 点                                         |                                |  |  |  |
|                                          | •                  |                                         |                            | た険皮評価チェックリスト                 |                      |                                        |                    |                    |                          |                                           |                                |  |  |  |
|                                          | 大分類                | 概要                                      | 観察アイテム                     |                              | 不 安 定                | 化要因                                    |                    | 備                  | 考                        | AHP                                       |                                |  |  |  |
|                                          |                    | ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ |                            | .× ←                         |                      | → 小(もしくは 安                             | 定化要因)              | 規模                 | 位置                       |                                           |                                |  |  |  |
|                                          |                    | _                                       | A:運動様式                     | 流動痕 .<br>圧縮丘 <sub>12.1</sub> | 副滑落<br>崖 4.9         | 分離崖<br>満状凹地<br>2.0                     | なし                 |                    |                          |                                           |                                |  |  |  |
|                                          | 移動                 | 連<br>動<br>物<br>動<br>体<br>の<br>問         | 理<br>動 <sup>B</sup><br>動 特 | 連動<br>移動<br>特                | 移動 時                 | 移動特                                    | B:新鮮さの程度           | 微地形多<br>19.5       | 微地形境界<br>・・・・ が<br>鮮明 12 | 境界が <sup>#</sup><br>.5 不鮮明 <sub>6.0</sub> | <sup>敗地形境界の</sup><br>消滅<br>5.5 |  |  |  |
|                                          | 動体の                |                                         | C:移動体不安定化                  | 先端2次ブロック(5<br>先端崩壊           | み化) 未<br>13.9 がり     | 分化・                                    | 全谷の侵入 1.5          |                    |                          |                                           |                                |  |  |  |
|                                          | 微地形                | はする世                                    | D:地すべり活動兆候                 | 亀裂 ···<br>18.8               | ・・・・ 亀裂状の±<br>6      | 地形・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | ・ なし <sub>.0</sub> |                    |                          |                                           |                                |  |  |  |
|                                          |                    | 標                                       | その他                        | ( 4a⊫ - ≚                    | 息地 池 表層)             | 崩速 雁行状鱼裂                               | 他)                 |                    |                          |                                           |                                |  |  |  |
|                                          | 地<br>す             | 時                                       | E:不動域/主滑落崖                 | 雁行亀!                         | <u>38</u><br>没有 崩壊壁の | 3.2<br>み有 匍行斜面化                        | 1.5<br>ガリーの(       | > 1.3<br>申長 全体/    | が従順化                     |                                           |                                |  |  |  |
|                                          | べ 関 り す            | べ<br>り<br>坊地                            | べ<br>り<br>暗地               | 関間<br>す経<br>る過               | F:主滑落崖/移動体           | 左記地升                                   | 3.1 1.<br>ドのみ 崖錐あ  | 8 1.1<br>り 大規模な崖錐  | 滑落崖                      | ▶<br>0.6<br>・崖錐・移動(                       | 本が連続                           |  |  |  |
|                                          | 界形部の               | 指に標                                     | G:移動体/前地表                  | 左記地研                         | 1.0<br>ドのみ ガリ        | 0.5 0<br>ー・沖積錐有 地表(                    | ).4<br>の従順化        | > 0.3<br>移動体原i     | 面の消失                     |                                           |                                |  |  |  |
|                                          | 地<br>とす<br>周べ      | 地関形する                                   | H:移動体先端部                   | 8.<br>河川攻墜斜面                 | .6<br>に面する (河川       | 4.4<br>に面する or 斜面途中()                  | こ出る)               | ▲<br>1.6<br>平坦面にのる | ボトルネック<br>D.9 閉塞<br>対岸衝突 |                                           |                                |  |  |  |
|                                          | 辺り<br>環地<br>境形     | るに<br>指<br>標                            | :移動体下部                     | <u></u>                      | 19.2                 | 起伏量(移動体のボテ:<br>9.2<br>中間               | >>ャル変化)、           | > 2                | ,7<br>€ 下                |                                           |                                |  |  |  |
|                                          | 地すべり<br>特記すべき<br>ク | 移動体内<br>小ブロッ                            |                            | あり                           | ・ なし                 | (位置及び全体との                              | D関係他:ቮ             | 南端の小ブロ             | <b>ック</b> )              |                                           |                                |  |  |  |
|                                          |                    | 地<br>す                                  |                            |                              |                      |                                        | AHP評               | 価合計点               |                          | 点                                         |                                |  |  |  |
|                                          | 記<br>事             | その他成因                                   |                            |                              |                      |                                        |                    |                    |                          |                                           |                                |  |  |  |
|                                          | 参考                 | 事 項                                     |                            |                              |                      |                                        |                    |                    |                          |                                           |                                |  |  |  |
|                                          |                    |                                         |                            |                              |                      |                                        | 1                  |                    |                          | _                                         |                                |  |  |  |
| ◆●評価を行った地すべりプロック<br>(小プロックを対象とする場合)      |                    |                                         |                            |                              |                      |                                        | 整理                 | 苗号                 | 地区名                      | 6                                         |                                |  |  |  |
|                                          | 1<br>1/11 = +      | 1                                       |                            | *2                           | 動履歴・災害履歴・            | 地質・地質構造他 あれば記;<br>※AHPのchecké          | 入<br>立面の点数を含       | 計してAHP評価タ          | 計点とする。                   |                                           |                                |  |  |  |





図-5 地すべり地形の変化過程と指標微地形

判読者は1カルテに対し3人以上で見ることになっており、このときAHP点で乖離が大きく、合意度(C)が小さいカルテについては再協議して合意度を高める工夫をしている.なお、宮城全県での危険度判定は、あらかじめ地すべり領域を設定して行った.地すべり領域は、例外的に大規模なものを除き、1/2.5万地形図に示された3.0m以上の道路からGIS上で1kmのバッファを発生させ、それに掛かるような地すべり地形のみを抽出対象とした.また地すべり一個ずつを対象とするのでなく、集水域界・尾根線・谷線などの境界からある程度のまとまりを持った領域としてくくり抽出した.

#### 2.5 手法の妥当性検討

AHP 手法による危険度評価手法の妥当性を検討 するにあたり,専門部員の直感による平均点と AHP 点について解析し,そのなかで2005年以前に 地すべり変動が認められた箇所も示した.図-6に この結果を示す.図からAHP 点と直感点の相関は 決定係数0.88以上と高い.またAHP 点の40以下 での地すべり発生事例はなかった.AHP 点 60以上 については22箇所の地すべり発生の危険性の高 い領域が該当していて「地すべり危険性の高い領 域」として指標化した.



#### 図-6 全判読地すべりと

#### 地すべり発生箇所の AHP 点数

#### 3.検証

#### 3.1 2004年中越地震

2004年中越地震では、地すべりの再動が多く認められた.地震直後に地すべり学会緊急調査団による現地調査と地形調査が実施され、また地すべり発生地については、岩手宮城県方式カルテによってすべり前後の空中写真を使って AHP 評価が行

われた<sup>[4]</sup>. その結果, 地震性土砂災害は, その多 くが地すべり地形の中に発生し、中でも地すべり 性の破壊は、砂岩、砂岩泥岩互層で多発した.元 来中越地方の地すべりは,砂岩地域と比較して泥 岩地域の地すべり地形が多いのが特徴であるが, 泥岩卓越地帯ではそれほどでもなかった. とはい え泥岩で構成される地すべり地形は、地すべり地 形の再活動危険度(AHP 点)が高まるに連れて地 震破壊レベルが増す傾向が認められた.他方,砂 岩や砂岩・泥岩互層では地すべり地形の AHP 点と 破壊レベルに相関は認められず、雨雪型地すべり とは異なった特徴を有していることが明らかにな った.なおハスバートル<sup>55</sup>らの研究では中越地震 時の地すべりの発生地形要因を GIS 上で検討した 結果,縦断的凸度,下端勾配,浸食最大深の3項 目で関連性が大きいことが示された.

#### 3.2 2007年大雨災害

宮城県白石市では平成19年7月15日から16 日にかけて、台風4号(連続雨量200mm)の影響 と融雪により、幅約200m、長さ約300mの大規模 な地すべりが発生した.現場は砂岩泥岩互層の基 盤岩と軽石凝灰岩の流れ盤構造を有するところで、 夷倉川沿いで侵食地形が認められたところである. 宮城県では、2005年に約1500箇所の地すべり領 域の危険度判定を行っており当概地区も該当して いたため、これを再チェックした.事前のカルテ は夷倉川右岸の被災エリアの3倍くらい大きい細 長い領域区分で作られていて、判読写真が若干不 鮮明であったことから判読者毎の評価結果にやや 幅があったがAHP点は平均で54と割合ハイスコア であった.

#### 3.3 2008年岩手宮城内陸地震

2005年の宮城県で実施された危険度判定をも とに 2008年岩手宮城内陸地震で発生した地すべ りを検証した.図-7は宮城県北西部地すべり領域 における AHP 点の分布と実際発生した地すべりを 重ねたものである.最も面積の大きい太線領域が 荒砥沢地すべりで,事前の AHP 点は 64 であった. また,ほかの地すべり発生箇所で,判読判定済み の領域での AHP 点はすべて 60 以上であった.しか し地すべり地形と認識されていない領域で地すべ りが発生したことや,地すべり地形と認識されて はいたものの判定領域外なために AHP の照査が出 来ない箇所もあり問題を残した.



#### 図-7 事前 AHP 点評価とその後の 2008 岩手・宮城 内陸地震での地すべり発生箇所

#### 3.4 2008年岩手宮城内陸地震の追加判読検証

3.3 の地すべり地形非認知の原因の一つとして NIED による地すべり地形が元来幅 150m 規模以上 であることがあげられる.また領域設定も道路の 1km バッファをはずれると領域認定されないこと も原因である.このため再度国土地理院(1976年, 1/15,000)の空中写真を用い宮城県・岩手県側そ れぞれで地すべり地形判読とカルテ 100 事例をラ ンダムに抽出し検討した. その際専門部員6名を 招集し1カルテにつき3名で判読しAHP 点を検討 した. 100 事例中 29 事例が当地震で再滑動してい るが専門部員にはどの地すべりが変動したのかに ついては事前には伝えられてはいない. 図-8 は再 滑動した地すべりを含め, 判読者の直感点数と AHP 点の平均を図化したものである.100 事例のう ち,再滑動した地すべりの AHP 点数は 30 点台から 80 点台までばらついているものの, AHP 点数 60 点以上の地すべりは 28 事例あり, そのうち 12 事 例(43%)の地すべりが再滑動している.また, AHP 点数 80 点以上の地すべりは3事例中2事例が 再滑動した.しかし 60 点未満であっても,地震を 誘因とする地すべりの再滑動が発生しうることを 示した.そこで,地形量の指標として,次に述べ る「先端勾配比」について新たに検討した.





#### 3.5 先端勾配比

これまでの研究[1][2][5]では地すべり末端の影響、 特にその凸度が地震に大きいウエイトを持ち得る ことが示された. それは地すべり移動体の末端が 侵食されると移動体が不安定になりやすく、移動 体表面形状の凸型の増大は滑動ポテンシャルの蓄 積になることに起因していると思われる.そこで、 図-9に示すように斜面を3分割し、斜面全体の勾 配に対する先端1/3の勾配の比率を「先端勾配比」 として定義して検討した. 結果は図-10 に示すと おりで,対象100事例の地すべりの先端勾配比は, 最大でも2.0程度であった.その分布は非対称形 を示し, 平均は 1.13, 標準偏差は 0.403 である. 再滑動した地すべりの先端勾配比の平均は 1.17, 標準偏差は 0.359 であり,対象全体からみると値 の大きな側に少しばかりシフトする.したがって, 先端勾配比は、地震時に不安定化する地すべりの 指標となりうると考えられる.



図-9 地すべりの先端勾配比の概念図



#### 図-10 地すべりの先端勾配比

#### 4. まとめと考察

- ・AHP を用い空中写真判読による危険度評価手法 の開発を行った.この結果,カルテ指標の理解 と,判読手法のトレーニングが必要ではあるが, カルテ指標をチェックするという簡単な仕組み の中で AHP 点という地すべりの危険性の定量化 が可能となった.
- ・複数の判読者を要するものの、このことは判読の瑕疵や誤解を少なくすることに繋がるものであり、むしろ複数で行ことが重要である。
- ・当初、本研究は豪雨・融雪を誘因とするものを 対象とし、あくまで写真から認定できることを 条件として研究を行った。もとより地震要因に ついても判定の可能性が期待され、ある程度は 判定できることを示した。しかし、その後の地 震地すべりの研究を踏まえると豪雨・融雪に比

べて地震対応については末端ポテンシャルの増 大(先端勾配比)のウエイトを大きくする余地 もあろう.

- ・なお中越地震では地すべり地形のうち泥岩系に 比べ砂岩系のよりブリットルなものが地すべり 再動している.岩手宮城内陸地震でも溶結凝灰 岩などの硬質なものが被覆しているところで発 生している事例が多いようである.本来空中写 真だけで地すべりの内部物性を読みとることは 困難なことが多く,空中写真判読だけから地質 まで考慮したカルテは作り難いと思われる.し かしながら,踏査などで判明する地質補正など を考慮する手法の構築も視野に入れていくこと が重要であろう.
- 【 参考文献 】
- [1] 濱崎英作,戸来竹佐,宮城豊彦(2003):AHP を用いた空中写真判読結果からの地すべり 危険度評価手法,第42回日本地すべり学会 研究発表会講演集
- [2] 八木・檜垣他(2008):空中写真判読と AHP 法を用いた地すべり地形再活動危険度評価
   手法の開発と阿賀野川中流域への適用, 日本地すべり学会誌 Vol. 45, No. 5 pp. 358-366
- [3] Saaty, Thomas L. (1980) : The Analytic Hierarchy Process, NewYork, McGraw-Hill Book Company, 265p
- [4] 宮城他・地すべり学会(2004):「中山間地 における地震斜面災害-2004 年新潟県中越 地震報告(I)-地形・地質編
- [5]ハスバートル,丸山他(2009):新潟県中越 地震を事例とした地すべり発生条件の考察, 土木技術資料 51-3, pp20-23

## GIS を用いた土砂災害予測およびハザード評価

GIS-based prediction and hazard assessment of landslide and debris flow

王 純祥,古谷 元,渡部直喜,丸井英明 (新潟大学 災害・復興科学研究所)
 Chunxiang WANG, Gen FURUYA, Naoki WAYANANE, Hideaki MARUI
 (Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University)

**キーワード**: GIS, 地すべり, 土石流, 予測, ハザード評価 Keywords: GIS, landslide, debris flow, prediction, hazard assessment

#### 1. はじめに

斜面崩壊・地すべり・土石流は斜面における破 壊現象が発生したときの主な運動形態であると ともに、山岳地域における土砂災害の原因でもあ る。降雨や地震を誘因とする土砂災害に対し、被 害を最小とするための的確な予測は極めて重要 である。土砂災害の予測には、「どこで」、「どの 程度の規模で」に加えて、「どのように」(引き金 となる現象の発生から災害に至る一連のシナリ オ)を予測することが理想的である。近年、新し い手法として GIS を用いた土砂災害の評価が多 く提案されている。GIS は異なる種類の空間情報 を統合して管理および解析するツールとして、 様々な分野において高度に利用できる。GIS の空 間解析機能を用いることにより、地形、地質、地 下水、降雨量等データを容易に統合でき、土砂災 害予測に関わる種々の空間情報の定量把握, さら にはシミュレーションを可能とする。GIS を用い た土砂災害の評価手法は大きく二種類に分けら れる。一つは統計的解析法であり、もう一つは数 値解析を利用した数値モデルである。本研究では, 土砂災害(地すべり・土石流)の予測およびハザ ードマップの高度化を試みることを目的とし、次 の二段階の手順で構築される手法を提案した(図 -1)。まず, GIS をベースにした三次元極限平衡法 安定解析により,危険斜面の予測を行う。次に, 予測された危険斜面に対して, GIS と数値解析法 のカップリングによる準三次元地すべり・土石流

運動のシミュレーションを行う。提案手法の有効 性を評価するために,2003年7月に熊本県水俣 市宝川内集地区で発生した土石流災害の事例に ついて検討した。その結果,実際の斜面崩壊およ び土石流化した箇所とシミュレーションにより 得られた結果が一致し,周辺地域における危険斜 面の抽出と土砂到達範囲の予測に適用可能であ り,本手法の有効性が確認された。



## 2. 2003 年 7 月水俣市宝川内集地区の土砂災害

#### 2.1 災害の概要

2003 年 7 月 18 日から 20 日にかけて,日本列 島上に停滞していた梅雨前線が活発し,九州各地 に集中豪雨をもたらした(岩尾雄四郎,2003;千 木良昌弘,Sidle Roy C,2004)。図-2 に崩壊を 発生させた降水の状況を示す。この豪雨によって, 20 日午前 4 時 20 分頃,熊本県水俣市宝川内集川 上流の斜面崩壊による土石流が発生し,下流約 1.6km に位置する集地区の集落に被害を与えた (図・3)。被害状況は死者 15 名,住家全壊 13 棟, 半壊1棟であった。

#### 2.2 崩壊発生のメカニズム

崩壊の頭部は標高 433m,河床部は 342m,比 高差約 90m である。頭部から河床までの水平距 離は約 150m であり,平均勾配は,約 30°である。 崩壊幅は頭部で約 50m,中央部約 80m,河床部 で約 100m であり,下部ほどやや拡がる形状であ る。崩壊地内の地質は,上層部が強風化の安山岩 (An-7),下位は難透水性の凝灰角礫岩 (An-5) で構成される(図-4)。



(2003年7月19日0時~7月20日22時)



図-3 斜面崩壊が土石流化した様子(水俣市宝川内 集地区,撮影:アジア航測(株))



図-4 崩壊斜面の概要

#### 3. 水俣市宝川内集地域の危険斜面予測

#### 3.1 広域の危険斜面における仮定

広域中間山地における危険斜面を予測する場 合,斜面崩壊の再発の可能性を分析する必要があ る。そのため,過去に発生した斜面崩壊のメカニ ズム解析が重要となる。J.N.Hutchinson 等の研 究に基づいて,以下の仮定を設定し,危険斜面を 予測した。

(1)類似の地質,地形,水理,気候条件の地域は崩壊再発の可能性が高い。

(2)過去に発生した崩壊とメカニズムが類似する。(3)崩壊後の土塊の運動形態も過去の事例と類似

し,いわゆる斜面崩壊→土砂すべり→水と土砂 の混合物の高速流動(土石流)という運動形態 をなす。

以上の仮定に基づき,二段階の手順を用いて水俣 市宝川内集地域の危険斜面予測及び土石流災害 を解析・評価した。調査対象とした範囲は,図・5 に示した 3km×2.5km であり,この範囲の岩相区 分を図・6 に示した。本来,地形は三次元の複雑な 形態をしており,斜面の不安定に大きな影響を及 ぼす。広域的に危険斜面を抽出するには,自然の 地形から各単位斜面の空間分布の範囲を抽出す る必要がある。ArcGIS™ の水文分析ツールによ って,対象範囲の単位斜面を抽出した(図・7)。



図-5 調査対象範囲



図-6 調査対象範囲の岩相区分図(An-3:凝灰角礫 岩及び溶岩;An-5:凝灰角礫岩及び溶岩;An-6: 安山岩貫入岩;An-7:風化した安山岩溶岩類; An-8:安山岩溶岩;Py-3:火砕岩類;Asm:砂 岩・泥岩互層;gsmA:礫岩,砂岩,泥岩



図-7 区分された単位斜面の分布

#### 3.2 メカニカルパラメーターの逆計算

図-4 および図-6 に示されるとおり,崩壊箇所の 地質は表層が風化した安山岩,下位が難透水の凝 灰角礫岩である場合が多い。今後,このような箇 所は豪雨か地震があった場合,土砂災害発生の可 能性が高い。また,斜面崩壊を予測するためには, メカニカルパラメータが必要となる。下記の GIS をベースした三次元極限平衡モデル(修正したホ フランモデル,拡張ビショップモデルおよび拡張 ヤンブーモデル) (Xie ほか, 2003; Xie ほか, 2006)を用いて解析した。

・修正したホフランモデル

$$SF_{3D} = \frac{\sum_{j=i}^{j} (cA + (W + P)\cos\theta \tan\phi)\cos\theta_{Avr}}{\sum_{j=i}^{j} (W + P)\cos\theta_{Avr}\sin\theta_{Avr}}$$
• 拡張ビショップモデル  

$$SF_{3D} = (\sum_{j=i}^{j} (W + P)\sin\theta_{Avr})^{-1} \sum_{j=i}^{j} \sum_{i=i}^{i} \frac{(W + P)\tan\phi + cA\cos\theta}{\cos\theta + SF_{3D}^{-1}\tan\phi\sin\theta_{Avr}}$$
• 拡張センブーモデル  

$$SF_{3D} = \frac{\sum_{j=i}^{j} [cA + N\tan\phi]\cos\theta_{Avr}}{\sum_{j=i}^{j} N\sin\theta\cos(\theta_{Asp} - \theta_{AvrAsp})}$$

$$N = \frac{P + W - SF_{3D}^{-1}cA\sin\theta_{Avr}}{\cos\theta + SF_{3D}^{-1}\tan\phi\sin\theta_{Avr}}$$

ここで、 $SF_{3D}$ は三次元安全率、Wは土柱(コラム)の重さ、Aはすべり面の面積、Pは各コラムに作用する鉛直力(分布荷重の合計)である。ここではP=0とし、Nは各コラムの鉛直力、cはすべり面の粘着力、 $\varphi$ は内部摩擦角、 $\theta$ はすべり面の領斜方向、 $\theta_{Avr}$ は各コラムの傾斜角度、 $\theta_{AvrAsp}$ すべり体の平均傾斜角度、jとiはすべり体範囲内のラスタデータのグリッドセルの行と列の数である。

表・1 に計算結果を示した。ここで、三次元安全率は1.0より小さい。*c*, *q*の平均値は*c*=20kn/m<sup>2</sup>,
 *q*=26<sup>°</sup>である。この値は、水俣市宝川内地域の地質メカニカルパラメータとして、潜在危険斜面予測する際に使用する。

| case                             | 3D Safety Factor            |                                                                   |       |  |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------|--|
| ( <i>c</i> : kn/m <sup>3</sup> ) | Revised<br>Hovland<br>model | sed extension extension<br>and Bishop of Janbu<br>lel model model |       |  |
| $c = 20, \phi = 23^{\circ}$      | 0.801                       | 0.834                                                             | 0.786 |  |
| $c = 21, \phi = 26^{\circ}$      | 0.949                       | 0.981                                                             | 0.903 |  |
| $c = 19, \phi = 26^{\circ}$      | 0.801                       | 0.839                                                             | 0.768 |  |
| $c = 23, \phi = 33^{\circ}$      | 1.102                       | 1.159                                                             | 1.059 |  |
| $c = 19, \phi = 25^{\circ}$      | 0.830                       | 0.867                                                             | 0.795 |  |
| $c = 22, \phi = 25^{\circ}$      | 0.978                       | 1.010                                                             | 0.931 |  |
| $c = 21, \phi = 31^{\circ}$      | 0.955                       | 1.006                                                             | 0.919 |  |
| $c = 24, \phi = 30^{\circ}$      | 1.132                       | 1.177                                                             | 1.081 |  |

表-1 メカニカルパラメータ及び安全率

#### 3.3 斜面崩壊の危険箇所

三次元で斜面安定性を評価するためには, すべ り面の空間形状を特定する必要がある。ここでは, すべり体の空間形状を楕円体の一部分と仮定す る。楕円体の空間姿勢と寸法は,中心点位置,傾 斜方向,傾斜角,および楕円体の径によって決定 される(xie など 2003, 2006)。楕円体の中心位 置および寸法を変化させることによって,様々な 潜在的なすべり面の形状を想定し,このすべり面 に囲まれる全てのすべり体に対して三次元安定 計算を行う。一つの単位斜面において,すべり面 を変動させて安全率を求め, 1.0 より小さい計算



図-8 崩壊発生箇所と予測された 19 箇所の危険斜 面(①は 2003 年の斜面崩壊, ②~⑤は予測さ れた危険箇所)

結果の数と計算した総数の比が 80%を上回る場 合に危険斜面とみなした。図-8に,水俣市宝川内 地域の危険斜面を示す。

#### 4. 二次元土石流数値モデル

#### 4.1 土石流の運動方程式

土石流は水と砂・礫の混合物であり,土石流の 流動は水の流れと土砂の流れとの中間的な力学 に支配されているため,その構造は複雑である。 多くの研究者が独自に構成則を提案しているが, 普遍性の高い構成則は未だ確立されていない(地 盤工学会,2003;高橋,2004)。本研究では,土石 流の運動をモデル化することによって,土石流の 流動とそれに伴う氾濫量及び範囲を予測する。土 石流の発生過程から堆積が終了するまでの過程 を追跡するために以下の方程式を用いる。

・連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$
(1)  
• 運動方程式  

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \alpha \frac{\partial (M\overline{u})}{\partial x} + \alpha \frac{\partial (M\overline{v})}{\partial y} = -\frac{\partial H}{\partial x}gh + \frac{\mu\beta}{\rho_d} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\right)$$

$$-\mu\sqrt{gh}\cos\theta_y \tan\phi$$
(2)  

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \alpha \frac{\partial (N\overline{u})}{\partial x} + \alpha \frac{\partial (N\overline{v})}{\partial y} = -\frac{\partial H}{\partial x}gh + \frac{\mu\beta}{\rho_d} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right)$$

$$-\mu\sqrt{gh}\cos\theta_y\tan\phi\tag{3}$$

式(1)は 2 次元連続方程式, また支配方程式は運動 量保存則から誘導される (式(2)と(3))。ここで, tは時間,  $M \ge N$ はx, y方向の単位幅当たりの 流量,  $\overline{u} \ge \overline{v}$ はx, y方向の平均流速,  $a \ge \beta$ は 運動量補正係数, gは重力加速度, hは流動深, Hは標高+h,  $\mu$ は動粘性係数,  $p_d$ は等価密度,  $\varphi$ は内部摩擦角である。

#### 4.2 運動方程式の差分化

運動方程式および連続方程式の離散化は有限 差分法によって行う。GISのグリッドメッシュ (grid mesh)を有限差分法のメッシュとして(図 -9),連続流体の連続式と運動方程式の基礎式を差 分法により離散化する。

GISのラスタデータは,正方形のセル(メッシ ユ)の集合体であり,各セルの属性情報として標 高などの情報を与える。ラスタデータによる流れ の方向の計算は各セルが8つの可能な流れ方向(上 下左右,および4つの対角線)を持っており,図・10(a) に示されるように角度によって表現される。図 -10(b)は流れ方向値の例を示しており,数値は標高 を表わしている。流れ方向は、ラスタデータのDEM から決定する最急勾配方向となっている。計算方法 としてDEMのセルに基づく有限差分法を使用した。



図-9 2 次元土石流数値モデルのためのグリッドメ ッシュ

|                  | 240   | 235    | 230     | 240     | 245   |
|------------------|-------|--------|---------|---------|-------|
|                  | 237   | 232    | 225     | 235     | 240   |
| 135 90 45        | 230   | 228    |         | 230     | 235   |
|                  | 228   | 226    | 210     | 220 2   | 228   |
| 225 <b>¥</b> 315 | 220 — | ×218 − | ≥ 205 ← | - 212 ¥ | - 215 |
| (a)              |       | (1-    |         |         |       |

図-10 各セルの流れの方向(a:可能な流れ方向;b:DEMのセルにおける流れの方向)

次に連続方程式(1)式と運動方程式(2), (3) 式の差分化を示す。

・連続法方程式の差分化

$$\frac{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+3} - h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{M_{i+1,j+1/2}^{n+2} - M_{i,j+1/2}^{n+2}}{\Delta x} + \frac{N_{i+1/2,j+1}^{n+2} - N_{i+1/2,j}^{n+2}}{\Delta x} = 0$$
(4)

$$\frac{-\frac{N_{i+1/2,j+1}^{N-2} - N_{i+1/2,j}^{N-2}}{\Delta y} = 0$$
(4)

・運動方程式の差分化  $\frac{M_{i,j+1/2}^{n+2} - h_{i,j+1/2}^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{\alpha}{\Delta x} \left[ \frac{\left(M_{i+1,j+1/2}^{n} + M_{i,j+1/2}^{n}\right)^{2}}{4h_{i,1/2}^{n+1}} \right]^{2}$  $-\frac{\left(M_{i,j+1/2}^{n}+M_{i-1,j+1/2}^{n}\right)^{2}}{4h_{i-1/2}^{n+1}}$  $+\frac{\alpha}{\Delta y}\left[\frac{\left(M_{i,j+1/2}^{n}+M_{i,j+3/2}^{n}\right)\left(N_{i+1/2,j+1}^{n}+N_{i-1/2,j+1}^{n}\right)}{h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1}+h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}+h_{i-1/2,j+3/2}^{n+1}+h_{i-1/2,j+3/2}^{n+1}}\right]$  $-\frac{\left(M_{i,j+1/2}^{n}+M_{i,j-1/2}^{n}\right)\left(N_{i+1/2,j}^{n}+N_{i-1/2,j}^{n}\right)}{h_{i-1/2,j-1/2}^{n+1}+h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1}+h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}+h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1}}\right]$  $= -g \frac{\left(h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1}\right) \left(H_{i-1/2,j+1/2} - H_{i-1/2,j+1/2}^{n+1}\right)}{2}$  $+\nu\beta\left[\frac{M_{i-1/2,j+1/2}^{n}-2M_{i+1/2,j+1/2}^{n}+M_{i-1/2,j+1/2}^{n}}{(\Lambda\chi)^{2}}\right]$  $+\frac{M_{i,j-1/2}^{n}-2M_{i,j+1/2}^{n}+M_{i,j+3/2}^{n}}{\left(\Delta y\right)^{2}}$  $-\cos\theta_x \tan\varphi \sqrt{g \frac{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}}{2}}$ (5)

ここで, y 方向(3) 式は x 方向(2) 式と同様に 差分化を行う。

#### 4.3 土石流シミュレーション

水俣市宝川内集地区で発生した土石流のシミ ユレーションを行うにあたっては、上述の手法を 用いた。この場合、斜面崩壊の土塊の深さを土石 流の最初の厚さとして仮定し、流動パラメータは 土石流現象(表・2)の期間を通して一定と設定す る。シミュレーションによって,土石流が渓流の 流路に沿って延長 1500m を 230 秒かけて流下し たとの結果が得られた。平均流速は約 6.5m/s(約 23.4km/h)となった。平均流速での流下を仮定し た土石流の動的な進行と堆積のシミュレーショ

表-2 土石流の物性値

| $\rho(\text{kg/m}^3)$ | α    | β   | μ( <b>Pa·s</b> ) | $g(m/s^2)$ | tanξ |
|-----------------------|------|-----|------------------|------------|------|
| 2200                  | 1.25 | 1.0 | 0.11             | 9.8        | 0.6  |



 図-11 土石流災害の発生した水俣市宝川内集地区における土石流の流動・氾濫・堆積シミュレーション(a:30秒後;b:60秒後;c:90秒後; d:120秒後;e:180秒後;f:220秒後)

ン動画を30秒毎の6コマに分割して図11に示す。 土石流の深さと堆積物の厚さを得るための横断 線BBと断線BBとCCを図12(a)に示す。 土石 流発生後の60秒の時点で,土石流はBB横断面 に到達する。図12(b)は,60秒後,90秒後,120 秒後,150秒後,180秒後におけるBB横断面の 土石流の深さを表している。図12(c)はCC横断面 における土石流堆積物の厚さと危険な住居の位 置を示す。これらのシミュレーション結果は,現 地調査で得られた実際の土石流と良い一致を示 す。このことは,対象とした区域で豪雨によって 引き起こされる土石流のシミュレーションでは, 選択された手法が十分に適用できることを意味 する。







図-12 各断面における土砂の流動・堆積状況

#### 5. 土石流ハザードマップ

水俣市宝川内地域に発生する土砂災害の特徴 が2003年7月20日の斜面崩壊~土石流と同様で あると仮定すると,斜面崩壊による土塊は渓流で 土石流化し、渓流に沿って流下すると考えられる。 また、このような災害が起こる可能性の高い5つ の渓流を認識することができる。これらの渓流に は、それぞれの上流域に斜面崩壊の危険性の高い 斜面が存在する。それぞれの渓流毎に、最も崩壊 する可能性の高い斜面を一箇所選択し、土石流の 氾濫する範囲をシミュレーションした(図-8のケ ース1~5)。ケース1については、実際に発生し た土石流で、前節で同様のシミュレーションを行 っているので、ここでは省略する。不安定斜面の ユニットからの4つの土石流は、過去に発生した 斜面崩壊のデータによって補正したパラメータ を用いてシミュレーションを行った(ケース 2~ 5)。これらのシミュレーションについて、流動時 間と到達距離の計算結果を表-3に示す。さらに土 石流の流動状況(ケース2~5)を図-13に示した。 最後に、土石流危険区域を図-14 に示す。ここに は土石流の氾濫・堆積する範囲、被害を受ける可 能性のある住居や道路等が示されている。

| 表−3 | ケース | $2\sim 5$ | の結果 |
|-----|-----|-----------|-----|
|-----|-----|-----------|-----|

|                  | Case 2 | Case 3 | Case 4 | Case 5 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| Time(s)          | 160    | 180    | 100    | 50     |
| Distance(m)      | 1100   | 1300   | 700    | 400    |
| Average velocity | 6.9    | 7.2    | 7.0    | 8.0    |
| (m/s)            |        |        |        |        |

#### 6. まとめ

2003年7月20日に熊本県水俣市宝川内集地区 で発生した土砂災害にいて実施した現地調査は, 調査地域における典型的な斜面崩壊のメカニズ ムに対する洞察を提供した。強風化の安山岩溶岩 (An-7)が難透水性の安山岩質凝灰角礫岩 (An-5)を覆う地質構造の斜面では,豪雨によっ



ケース2

ケース4



ケース5





**図-13** シミュレーションによる土石流の発生・流動 ~氾濫・堆積の範囲(ケース 2~5)



図-14 住居や道路を図示したハザードマップ

て雨水が An-7 の中に浸透することで斜面崩壊を 発生させる傾向が見て取れた。このような斜面で は雨水の浸透しにくい An-5 との境界面付近で間 隙水圧が上昇し, An-7 と An-5 との境界面に沿っ て斜面崩壊が発生する可能性が高いと言える。

これらの研究に基づいて、3次元斜面安定性分 析のパラメータを逆計算した。斜面崩壊の危険箇 所を見いだすために、ArcGISの水文分析ツール によって区分した斜面単位において,GISを使用 した斜面安定性分析とモンテカルロシミュレー ションの三次元極限平衡モデルに基づいて崩壊 危険箇所の抽出を行った。

土石流の多くは、降雨に誘発された斜面崩壊の 形態で発生し、渓流の流路に移動して土石流化す る。安全地帯を見いだすために鍵となる必要条件 は、土石流の移動距離と複雑な地形を流れて氾 濫・堆積域に至る軌道を特定することである。著 者らは GIS を活用し、深さを平均化した二次元の 数値解析モデルを開発した。DEM のラスタデー タのグリッドをメッシュとして利用することに より、連続方程式と運動方程式を差分化し、数値 解析を可能とした。シミュレーションは、実際に 発生した土石流を模倣するようにモデル化され た。シミュレーション結果は、実際の土石流をほ ぼ正確に再現している。

このシミュレーション手順は土石流の発生す る可能性のある水俣市宝川内地域の他の渓流流 域においても適用された。過去に発生した斜面崩 壊のデータによって補正されたパラメータを用 いて、4 つの不安定な斜面単位からの土石流シミ ュレーションを行った。土石流シミュレーション の結果、土砂の氾濫・堆積する範囲が示され、土 石流の被害を受けるかの性の高い住居や道路が 図示できた。

被災地を予測するとき,実際に土砂が氾濫・堆 積する範囲は,斜面崩壊の規模と数,降雨量や地 形等にも支配されるので,パラメータに起因する 若干の不確実性は残る。しかしながら、本研究で 開発したシミュレーション手法は拡張性もあり、 異なる現象により他地域でも発生する土砂災害 の被害状況の想定にも応用できる。

#### 引用文献

- 岩尾雄四郎(2003):2003 年熊本県水俣市で発生した豪雨 による斜面災害。日本地すべり学会誌, vol.40,P239-240.
- 千木良昌弘, Sidle Roy C (2004): 2003 年 7 月九州土砂災
  害の発生場・水俣・菱刈地区・. 京都大学防災研究所年報,
  第 47 号 A, P91-98.
- Hutchinson JN (1995): Landslide hazard assessment.In: Proceeding of sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, vol. 1:1805-1842
- Xie M, Esaki T, Zhou G, Mitani Y (2003): Geographic information systems-based three-dimensional critical slope stability analysis and landslide hazard assessment. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129: 1109-1118.
- Xie M, Esaki T, Qiu C, Wang C (2006): Geographical information system-based computational implementation and application of spatial three-dimensional slope stability analysis. Computers and Geotechnics, 33(4-5): 260-274.
- 地盤工学会(2003): 土石流。地盤工学会土石流編集委員会, P41-77.
- 高橋保(2004):土石流の機構と対策。近未来社,P45-112.

第39回地すべりシンポジウム 土砂災害に関わる危険度評価とリスクマネージメント 2011.5

編集·発行 (社)日本地すべり学会新潟支部 印刷 株式会社 文 久 堂

(社)日本地すべり学会新潟支部のホームページhttp://www.landslide-niigata.org