

道路落石対策に用いる発生源の特定化

浅野憲雄* 杉井俊夫** 山田公夫**

Specification of the falling-rock source for the measure against highway falling stone
by

Norio ASANO*, Toshio SUGII** and Kimio YAMADA**

Although the technology of falling-stone simulation is progressing, the specification of the place of falling-stone sources required for a simulation is judged by the expertise engineer skilled even now from the field survey. In this study, the base rock which appears on a slope was estimated with the angle of inclination of the slope using the detailed DEM. Furthermore the degradation situation of the base rock which constitutes a slope was evaluated in the amount of erosion. As a result, it is obtained that the place of the falling-stone source could be specified by combining a mountain land slope and the amount of mountain land erosion.

Key words: Falling rock, Outbreak source, GIS, summit level map

1 まえがき

落石災害は、全国各地の山間部で発生し、時には人命にも係わる災害である。近年、落石災害について、DEM¹⁾やDDA²⁾等の各種落石シミュレーションが提案され、落石対策についての検討が飛躍的に発展してきている。

一方、落石被害箇所についての検証に必要となる落石発生源の位置特定や危険度は、いまだに専門技術者による現地調査・判断に任せられているのが現状である³⁾⁴⁾⁵⁾。よって、本論文では、精密なDEMデータを用いて三次元モデルを作成し、同モデルを地形的・地質的条件で解析することにより落石発生源の位置特定手法を確立することを目的とした。

精密DEMを用いた落石発生源の位置特定化手法としては、落石発生源となる斜面内岩壁の分布を、斜面勾配から抽出することとした。また、斜面を構成する岩盤の劣化状況を山地侵食量という考えから推定を行い、これらの地形・地質的条件から求めた発生源位置と、既存の落石危険箇所及び被災箇所との関係をとりまとめた結果、地形・地質条件から求めた落石発生源と既存危険箇所との間に強い相関があることを得られた。

2 落石発生源の因子

落石災害には落石発生源の特徴によって大きく2種類に分類される。Fig.1⁶⁾⁷⁾に示すように、斜面内の露出岩盤を落石発生源とする場合は、亀裂などにより区切られた岩盤ブロックが抜け落ちて崩落するケース⁷⁾と、斜面内に転石状に岩塊が分布し、雨水侵食等により基盤が軟弱化し岩塊が落下するケースに分けられる。本論文では、容易に位置を特定できない斜面内に点在する岩盤露頭から抜け落ちる落石現象の発生源について検討を行った。

Fig.1 に示されるような落石発生源である岩盤露頭の

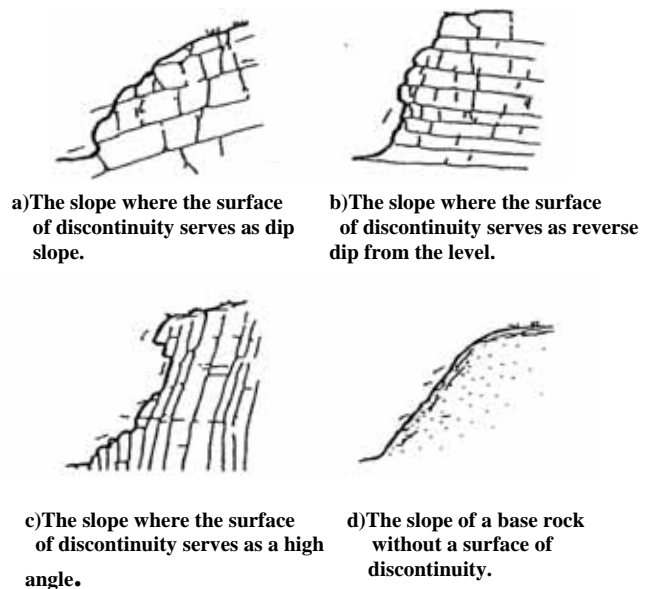


Fig.1 Falling rock outbreak source of the model⁷⁾

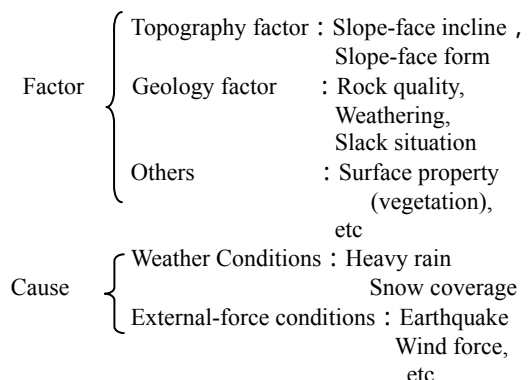


Fig.2 Factor classification of the falling rock outbreak

+ 原稿受理 2011年5月6日 Received

* 中部大学大学院工学研究科 〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200 Dept. of Civil-Eng., Chubu Univ., 1200, Matumoto, Kasugai, Aichi

** 中部大学工学部都市建設工学科 〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200 Dept. of Civil-Eng., Chubu Univ., 1200, Matumoto, Kasugai, Aichi

落石素因としては、Fig.2 のような因子がある。誘因には岩盤露頭の風化状態など素因と関係する部分もあるが、ここでは落石災害の素因として比較的広範囲に適応できる地形要因の斜面勾配と、地質要因である岩盤の緩みについて着目して落石との関係を検討した。

3 岩盤露頭と斜面勾配

3-1. 岩盤露出の条件

斜面内に分布する岩盤（基盤）が露出する条件としては、表土層が流出・崩落した結果として岩盤が露出すると考えられる。よって、表土が崩落する斜面勾配について検討を行う。式(1)は、杉井⁸⁾らが提案している地震時の影響も踏まえた自然斜面における表層崩壊の安全率を示すもので、斜面表層土層の有無を判定できるものである。

$$F_s = \frac{Z^2 + Z + c \tan \phi}{z^2 + z + c \tan \phi} \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} & \gamma(D \sin \theta + \cot \theta / 2) \tan \phi \\ & \{ [c \cot \theta + H(\gamma_{sat} - \gamma)] \cot \theta + \{ DH(\gamma_{sat} - \gamma) + E\gamma \} \sin \theta \} \\ & + c \tan \phi \\ & \{ [EH(\gamma_{sat} - \gamma) - cL] \sin \theta + H^2 \cot \theta (\gamma_{sat} - \gamma) / 2 \} \tan \phi \\ & (\cos \theta + k_h \sin \theta) D\gamma \\ & (\cos \theta + k_h \sin \theta) \{ DH(\gamma_{sat} - \gamma) + \gamma E \} + c(\cot \theta + k_h) \\ & (\cos \theta + k_h \sin \theta) \{ EH(\gamma_{sat} - \gamma) - cL \} \end{aligned} \quad \tan \phi \}$$

崩壊斜面長: L (m), 崩壊斜面深さ: z (m), 斜面傾斜角: (θ°) , 土の飽和単位体積重量: γ_{sat} (kN/m³), 湿潤単位体積重量: γ (kN/m³), 水中単位体積重量 γ_{sub} (kN/m³), 粘着力: c (kN/m²), 内部摩擦角 ϕ である。

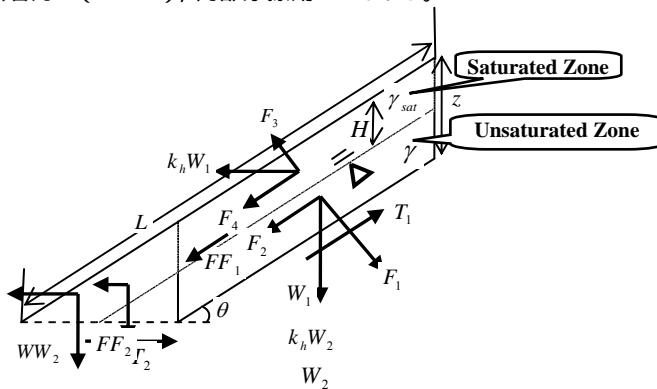


Fig.3 Figure of model of the dynamics in the slope

式(1)より、自然斜面における表土層の崩落限界傾斜角を、表土層厚を一般的に表層崩壊が発生する深さである $z = 2.0\text{m}$ と仮定し、表土層の強度定数として粘着力 $c = 4.0\text{kN/m}^2$, 内部摩擦角 $\phi = 25^\circ$ と仮定して検討した。ただし、自然斜面における表土層は、植生などに覆われることで見かけの粘着力を有するため、今回の検討では $c = 4.0\text{kN/m}^2$ と一般値よりやや過大に見込んだ。以上の検討結果を Fig.4 に示す。このような条件設定で検討すると自然斜面の安全率は、約 $45 \sim 50^\circ$ の傾斜角で最小値になることが判明した。これは、提案モデルの特徴として、崩壊形態が一つの表層ブロックが滑落する条件で検討しているため、ある角度を超えると土塊ブロックが自立することで、結果として安全率が向上するために生じるものである。このため、現実的には傾斜角 $45 \sim 50^\circ$ で表土が滑落し、基盤（岩盤）が露出することになる。

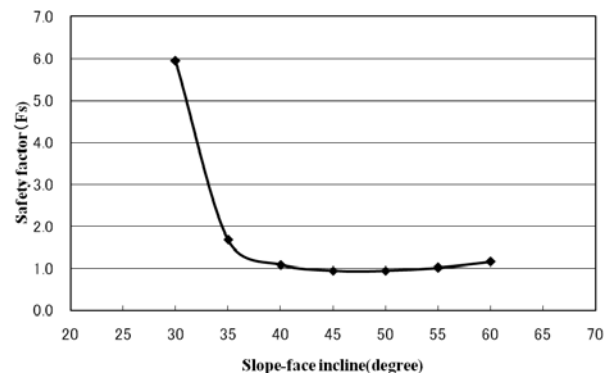


Fig.4 The relationship between a slope-face incline and a safety factor

3-2. 岩盤露頭分布と落石危険箇所

本研究では、斜面傾斜角 50° 以上である露出岩盤を落石発生源であると判定し、斜面内における位置・分布を特定する手法について検討した。今回、検討対象とした区域には、航空レーザ測量から求められた 2m メッシュデータ (DEM) が存在している。ここで、GISソフトを利用して当該地区の 2m メッシュデータから、当該区域山地の詳細な斜面勾配分布図¹⁰⁾を作成した。ここで 2m メッシュデータを用いた理由として、既存の落石発生源調査から発生源である岩盤露頭の



Notation introductory notes

- ★ Falling-stone disaster
- Measure part required
- The part corresponding to a chart
- Measure unnecessary part
- ◆ Exposure base rock part (angle of inclination of over 50°)
- National highway and prefectural road.

Fig.5 The dangerous place and rock face outcrop distribution map of falling rock.

高さが1~数mが大半であることが判明しており、公開されている10mメッシュデータでは解析できない範囲であると考えられるためである。GISで解析した詳細斜面勾配分布図より、斜面勾配50°以上の部分を抽出し、赤色で着色したものがFig.5である。

Fig.5には、平成8年度道路防災点検¹¹⁾による専門技術者が落石の危険性を認めた箇所と、その後発生した落石被災箇所を併記してある。Fig.5並びに、その後の現地確認作業から、岩盤露頭斜面と落石危険箇所は一致していた。この結果、斜面傾斜角50°以上の斜面を岩盤露頭と仮定したことの正当性が裏付けられた。

4 山地侵食量と落石危険箇所

4-1.接峰面図と山地侵食量

落石災害は、山地を構成する地質に強く影響される。山地を構成する地質は、岩質の硬軟・緩み具合、風化・侵食などの時間経過によって力学的性質が変化するものである。本研究では、急傾斜を示す岩盤露頭からの岩塊の抜け落ち・表層崩落などによって、落石が発生することが多いため、岩盤の緩み具合を一つの因子として検討した。岩盤の緩みは、断層等によって強制的に緩められることもあるが、大半が時間的経過を伴う山地侵食による応力開放によって緩みが発生する。ここで、侵食による応力開放は、比較的広域が同じ環境下で同様な影響を受けるため、落石の危険度を判定するには山地侵食量が有効な因子であると考えられる。

本研究では、山地を構成する岩盤の緩みを表現する手

法としての山地侵食量を図式化するために、Fig.6のような対象地域の三次元の接峰面図と三次元の現状地形図との差分を求めた。次に、差分量を山地侵食量図として、GISソフトで図化した。

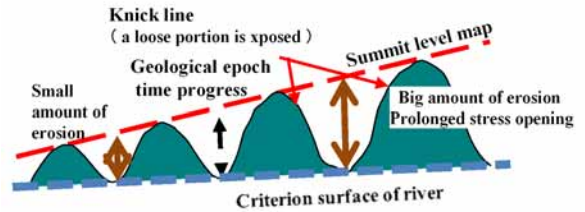


Fig.6 The key map using a summit level map and a topographic map

接峰面図は、一定の広がりをもつ平面を仮定し、その平面内の最標高点をもって固定平面の標高を仮定し、検討区域全体の侵食前の地形を想定するものである¹²⁾¹³⁾。ここで、検討に用いる接峰面図を作成する場合の注意点としては、検討区域の主谷幅をどの程度に設定するかということが挙げられる。主谷幅より狭い固定平面を設定すると、正確な旧準平原標高が求められなくなるため、検討区域の主谷幅を決定するにあたり、地形図より当該区域の主要河川中央付近の谷幅(谷を挟んだ山地稜線間隔)を主谷幅とした。

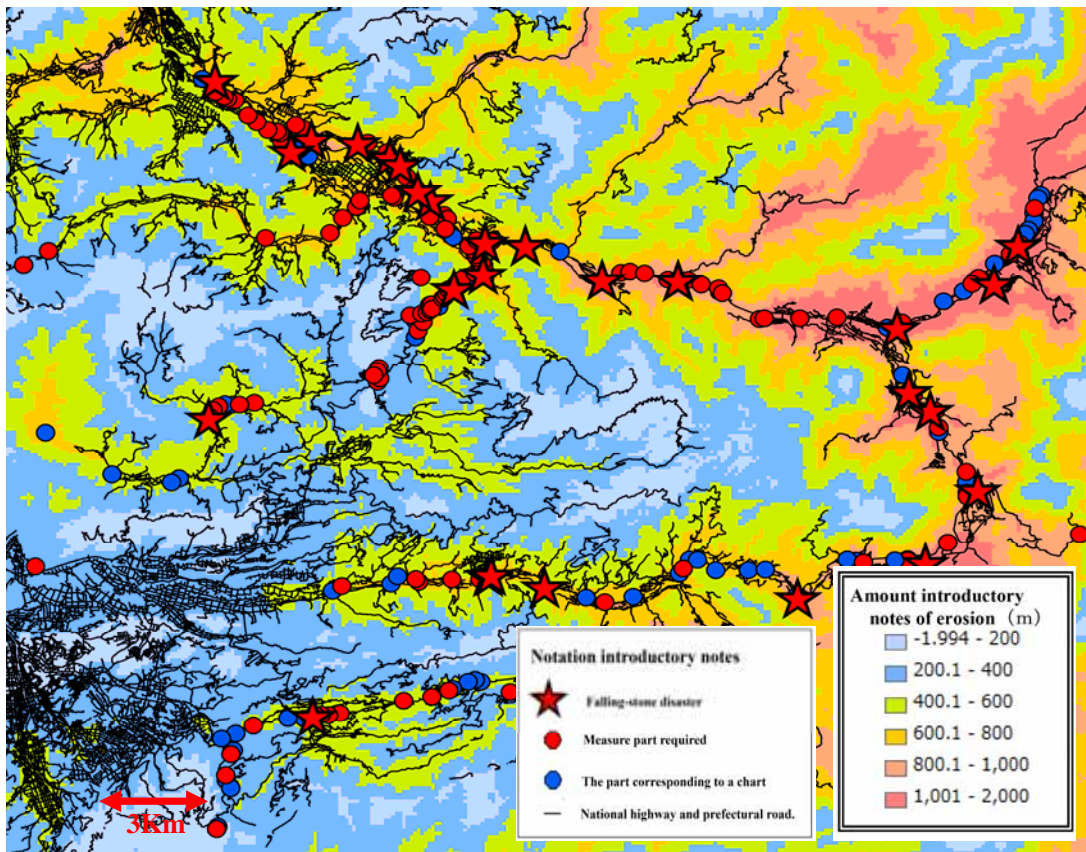


Fig.7 The amount Figure of mountain land erosion and a falling-stone dangerous place.

今回の報告では、主谷の中流部谷幅が 2km であったため、固定平面幅を 2.5km とした。この接峰面図と国土地理院が公開している 50m メッシュデータ¹⁴⁾を用いて作成した三次元地形図の差分を侵食量とした。このため、山地侵食量は、河川の基準面まで河川が山地を侵食することから、検討区域の山頂高度（旧準平原高さ）と谷底までの比高差となる。一辺 30km 程度となる区域の山地侵食量を図化し、侵食量 200m ごとに着色したものが Fig.7 である¹⁵⁾。Fig.7 には、当該地区における平成 8 年度道路防災総点検で、専門技術者が判定した落石危険箇所、並びにその後の落石被災箇所を併記している。

Fig.7 より、当該地区では、侵食量 600m 以上を示す橙色～褐色系に着色された区域に、落石危険箇所や被災箇所が集中している。この結果は、Fig.6 に示されるように高山地帯では、同じ地質的期間内で河川の侵食量が大きく、鉛直侵食が卓越するため急崖斜面を形成する。このため、低山地域に比較して遷急線より下方斜面内に岩盤露頭が形成され易くなることになり、落石発生源が点在することになる。つまり、風化・侵食により斜面勾配が小さい頂稜部から斜面勾配が急となる遷急線より下方斜面では、落石発生源である岩盤露頭の分布が集中することを意味する

4-2.山地侵食量と落石危険箇所率

本研究の対象区域における平成 8 年度道路防災総点検の落石危険箇所（総計 562 箇所）を、各侵食量区分（侵食量 200m で区分）の面積で除すことで単位面積あたりの危険箇所割合を整理した結果が Fig.8 である。Fig.8 より、前述したように侵食量 600m 以上で危険箇所割合が急激に増加していることが分かる。

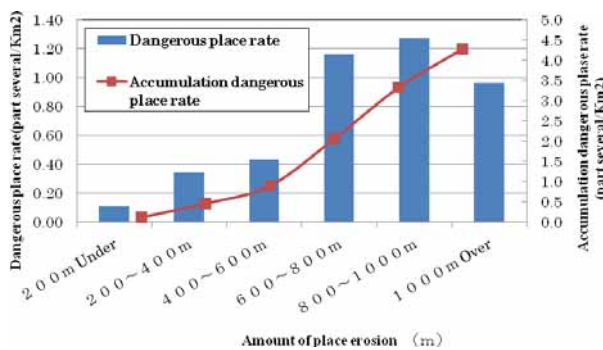


Fig.8 The falling-stone dangerous place rate in the amount of erosion of each stage

次に、当該地区における過去 10 年間の落石被災箇所（総計 29 箇所）についても、Fig.8 と同様に単位面積あたりの被災率（被災箇所 / 単位面積）を整理したものが Fig.9 である。この場合においても、危険箇所割合と同様に、侵食量 600m 以上で被災率が急激に増加していることが分かる。

当該地区の山地は、中・古生界の堆積岩を基盤とし、中生代末・第三紀末の火山性岩盤が覆う地質構造からな

り、比較的侵食されやすい岩盤で形成されている。また、近傍には、活断層の存在もあり岩盤が破碎されている。

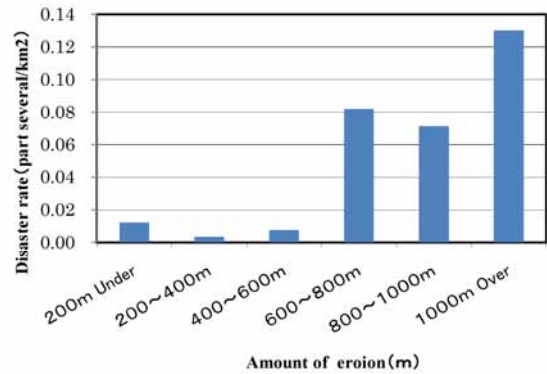


Fig.9 The disaster place rate in the amount of erosion of each stage

このような地質特性では、容易に山地の侵食が生じやすく、比較的大きな侵食量（600m 以上）で落石発生源である斜面内岩盤露頭が多く分布すると想定される。このことから、山地を構成する地質が異なると、当該地区とは異なった侵食量を基準とする落石危険箇所率等の増加傾向が生じるものと考えられる。しかしながら、他地域の地質が異なっても、山地侵食量と落石危険箇所の関係は他地域特有の侵食量と危険箇所率の関係が認められる可能性が高いため山地侵食量が重要な因子となり得る。

5 落石発生源の特定化と応用

本研究では、落石発生源である斜面内の岩盤露頭について、地形的因子である斜面勾配並びに、地質的因子である岩盤の緩みについて検討を加えた。その結果、斜面勾配 50° 以上・侵食量 600m 以上となる落石発生源の特定条件が認められた。この結果を図化したのが Fig.10 である。Fig.10 より、落石発生源である傾斜角 50° 以上の岩盤露頭分布は、等高線の密集度が変化する遷急線付近に分布することが分かる。これは、今まで言われてきた遷急線付近の岩盤露頭が、落石発生の危険性が高いことを裏付ける結果となった。また、平成 8 年度道路防災総点検で特定された落石危険箇所以外の箇所にも、山地上方に落石発生源と考えられる岩盤露頭が存在し、点検以後の落石被害を生じていることも判明した。このことから、GIS ソフトを用いて精密な DEM を用いた地形・地質解析を行えば、専門技術者の現地調査において、落石発生源の特定が容易にできるようになると考えられる。

Fig.11 は、今回の報告条件を公開されている三次元落石シミュレーションソフト¹⁶⁾¹⁷⁾（質点系）を用いて落石経路を検討した結果である。Fig.11 は、Fig.10 に示される斜面傾斜度 50° 以上の落石発生源と判定できる部分を赤色系に図示し、三次元化したものである。Fig.11 では、想定される落石発生源部分に不特定の落石発生源を配置し、右城¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾らの提案による質点系落石シミュ

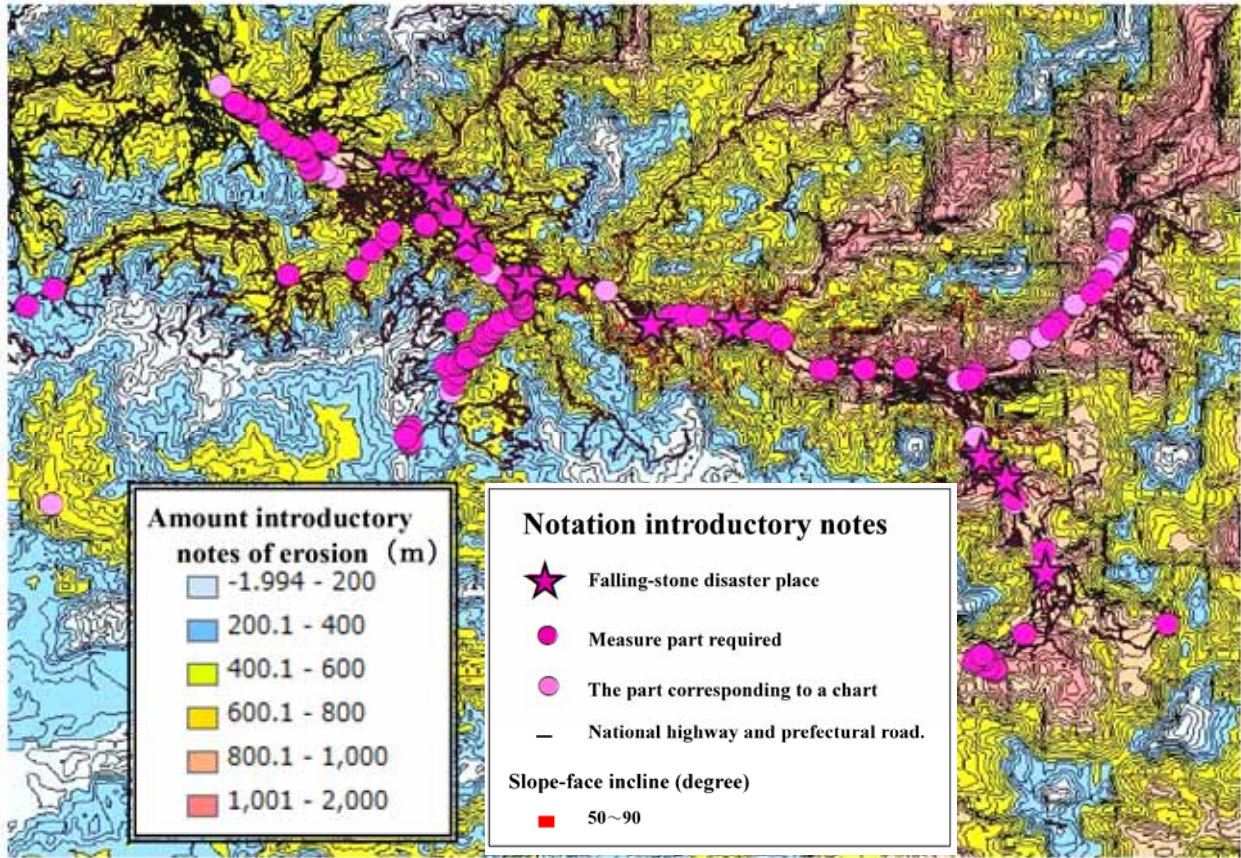


Fig.10 The related figure of a base rock inclination and the amount of mountain land erosion which are the condi

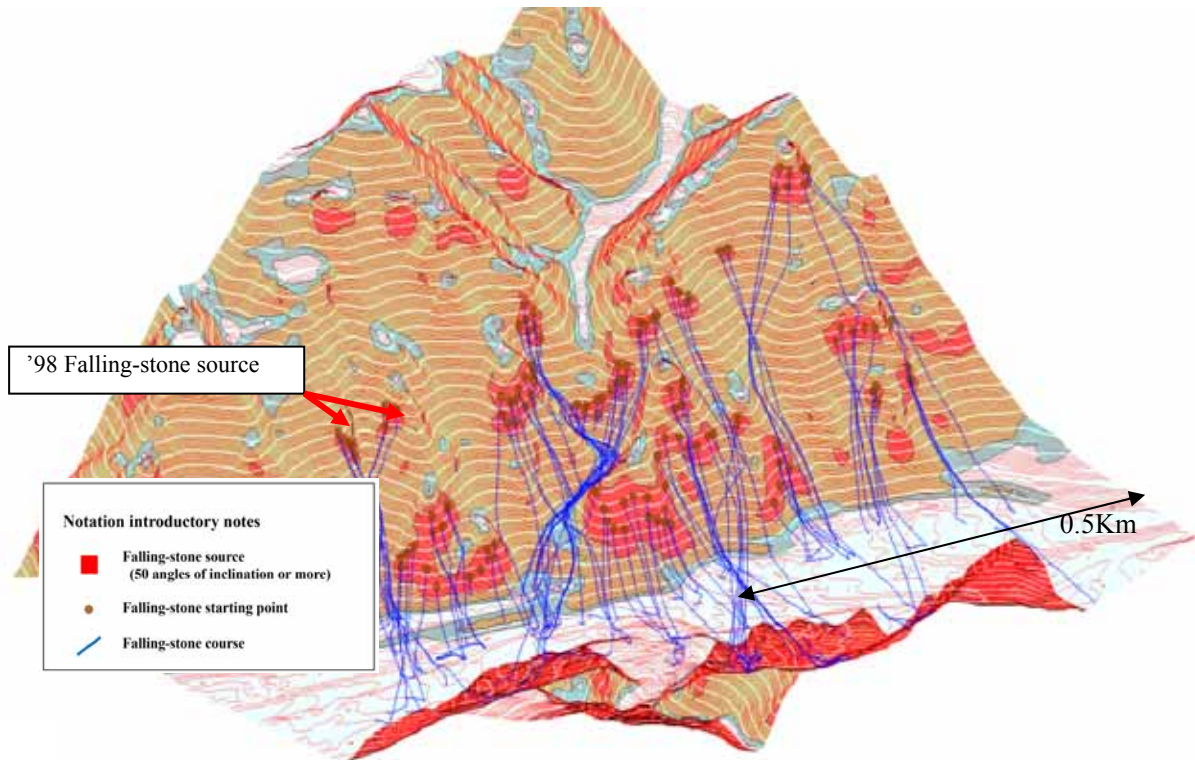


Fig.11 Three-dimensional falling-stone simulation result

レーション結果(軌跡)を示した。Fig.11には、1998年に当該地区で発生した落石発生源の位置を示すと、斜面傾斜度 50°以上の部分に位置していた。この状況も参考にして、斜面内の任意の落石発生源から不特定多数の落石を発生させることで、検討地点の落石が分散するか、もしくは集中する落石経路をたどるかを確認することができる。

このことは、一般的に行われている二次元の落石シミュレーションが、落石被災後もしくは発生源を特定する調査後に実施され、1箇所1経路の評価を行う目的で実施されることが多い。Fig.11のように、三次元的な落石シミュレーションを行うことで、専門技術者であっても発生源を特定しにくい高標高部からの落石に対しても落石経路等の特徴を把握することが可能となる。このことは、シミュレーション結果としての落石経路が集中する箇所に対して、道路落石対策工を検討することで、対策工の範囲設定・有効性・経済性が検討可能となり有効的な落石対策工の計画立案などに利用できる。

6 終わりに

今回は、詳細な DEM などを利用して、落石発生源の特定化の研究を行った。結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 落石危険箇所は、岩盤露頭斜面と考えられる斜面勾配 50 度以上が分布する箇所である。
- 2) 推定侵食量 600m 以上となると落石被災率が急激に増加することが明らかとなった。
- 3) 斜面勾配と推定侵食量と既存の危険箇所との間に創刊があることが判明し、本手法の有効性を得ることができた。

このような落石発生源の分布を想定できれば、今までのように熟練した専門技術者が調査する前に、ハザードマップ²⁰⁾として用いれば一次調査が容易になると考えられるほか、必要に応じ、事前の落石対策構造物の検討も可能となる。また、現地調査においても、既存資料としての落石発生源の位置などの資料があれば、精度よく落石発生源の危険性を把握することができるようになる。

今後は、今回の報告で用いた地形条件・地質条件以外の条件について検討し、落石発生源の特定精度を向上させたい。

謝辞

本研究は、中部大学特別研究(D)の援助を受けた。また、落石被災履歴・危険箇所については、岐阜県道路維持課の協力を得ました。ここに記して、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) たとえば 表真也・岡田慎哉・石川博之・伊藤佳彦・日下部祐基：個別要素法を用いた落石シミュレーションに関する検討，岩の力学国内シンポジウム講演論文集，Vol.12，Page.ROMBUNNO.115，2008.
- 2) たとえば 馬貴臣・松山裕幸・西山哲・大西有三：落石シミュレーションのための解析手法の研究，土木学会論文集 C，Vo.63，No.3，pp.913-922，2007.
- 3) 佐野貴洋・飯田温・西谷誠・本多美仁・岡野肇・本多豊・増田三男：富士山富士宮口の落石発生源の現状，中部ミニフォーラム
- 4) 太田岳洋：岩盤斜面からの落石の大きさを簡易に推測する方法，第 244 回鉄道総研月例発表会：防災技術に関する最近の研究開発
- 5) 岐阜県：岐阜県道路防災点検マニュアル，2011
- 6) 桑原啓三：斜面防災について(岩盤斜面を中心として)：新潟応用地質研究会，新潟応用地質研究会誌，36，pp3-15，1991年6月
- 7) 社団法人 日本道路協会 落石対策便覧(改訂版) 平成 12 年 6 月
- 8) 杉井俊夫・山田公夫・浅野憲雄：力学的アプローチによる豪雨および地震時における山地斜面の安定性評価，自然災害科学，Vol.29，No.1，pp.47-53,2010.
- 9) 日本道路協会：道路土工，切土工・斜面安定工指針(平成 21 年度版)
- 10) 浅野憲雄・杉井俊夫・山田公夫：接峰面図から見た落石発生源の検討，地盤工学研究発表会講演集，PP581-590，2011.
- 11) 岐阜県土整備部道路維持課：平成 8 年度道路防災総点検報告書
- 12) 安藤潤・江崎哲郎・三谷泰浩・池見洋明：GIS による阿蘇火砕流堆積物の分布と侵食過程の解析，岩の力学国内シンポジウム講演論文集，Vol.12，Page.ROMBUNNO.26，2008.
- 13) 長谷川浩一・若松加寿江・松岡昌志：ダム堆砂データに基づく日本全国の潜在的侵食速度分布，自然災害学会，2005 年
- 14) 国土地理院：数値地図 50m メッシュ(日本 中部地方)，2000.
- 15) 浅野憲雄・杉井俊夫・山田公夫：地形解析による落石発生源の特定手法の検討，土木学会第 65 回年次学術講演会講演集，印刷中，2011.
- 16) 右城猛・篠原昌二・谷田幸治・八木則男：落石の斜面衝突運動に関する研究，土木学会，第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，2000 年 6 月
- 17) 右城猛・筒井秀樹・篠原昌二：実斜面における落石実験，土木学会，構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，2002 年 7 月
- 18) 大久保政利・内原伸司・藤井淳哉・片田博士・右城猛：現地に残された痕跡からの落石運動の推定事例と考察，土木学会，構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，2002 年 7 月
- 19) 地層科学研究所：GeoGraphia 操作マニュアル
- 20) 上野将司・大河彰：落石のハザードマップ - 基図としてのあり方 - ，こうえいフォーラム第 10 号，2002