

個別要素法による 3 次元落石運動解析  
と適用に関する研究

2004 年 1 月

谷 口 洋 二

# 目 次

第1章 緒論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的と意義	2
1.3 本論文の構成	5
第2章 落石の発生形態と事例	7
2.1 はじめに	7
2.2 落石の定義と崩壊性の地形	7
2.3 落石の発生形態	11
2.3.1 抜落ち（転石）型落石	11
2.3.2 はく離（浮石）型落石	15
2.4 落石発生と地質・地形との関連	22
2.4.1 地質と落石の関係	22
2.4.2 斜面傾斜角と落石の関係	22
2.4.3 気象現象と落石の関係	24
2.4.4 地形的特徴	25
2.5 落石の安定度調査	26
2.6 鳥取県内の地質と落石	30
2.7 落石調査法と鳥取県における事例	32
2.7.1 鳥取県西部地震時に発生した大規模落石地域の調査解析	32
2.7.2 花崗岩分布地域で発生した落石斜面の調査解析	47
2.7.3 千枚岩分布地域で発生した落石斜面の調査解析	61
2.8 まとめ	63
第3章 落石の運動と対策工	65
3.1 はじめに	65
3.2 落石の運動機構	65
3.2.1 落石の運動形態	65
3.2.2 落石の基礎運動方程式	66
3.3 落石の既往現場実験例	71
3.3.1 日本道路公団の実験	71
3.3.2 建設省土木研究所の実験	73
3.3.3 四国建設コンサルタントの実験	75
3.4 落石対策工	77



# 第1章 緒論

## 1.1 本研究の背景

山地の多いわが国では、主要幹線道路や観光道路が山間部を縫うように走っている。しかしながら、国土の大半が脆弱な地盤であるため、降雨や地震等によって土石流や落石などの土砂災害が発生し、道路の寸断や人命に係わるような重大な事故が発生<sup>1)2)</sup>している。その一方、三木<sup>3)</sup>によれば、最近の20年間に国土交通省所管の国道における災害件数は5分の1に減少している。このような件数の減少は、道路防災対策の成果といえるが、依然として発生する落石・岩盤崩壊をはじめとする斜面災害は、台風や集中豪雨、積雪などの厳しい気象条件や脆弱な地質の分布に加え、抜本的な対策が取りにくい大規模岩盤崩落や投資効果の上がりにくい山間部の落石危険箇所などが依然として数多く残されていることを物語るものと考えられる。特に、落石危険箇所は地すべり地や土石流地帯などと比べると面的な広がりをもたないため、危険箇所を特定することが難しく、効果的な対策工が講じられにくいという特性を有している。

落石災害の誘因を挙げると、降雨、積雪、凍結融解、風、地震、樹木の根系の発達などである。この内、降雨に関しては、近年、わが国の降雨は集中的な豪雨に見舞われることが多く、数日で通常年の年間降雨量に匹敵する豪雨も珍しくなくなっている<sup>4)</sup>。これは、地球温暖化現象による影響とも考えられ、地球規模の気候変動によって今後ますます雨の降り方が異常になっていくとも予想される。その結果、さらに多くの土砂災害が引き起こされる危険性がある。

また、地震を誘因とする落石は、1968年の十勝沖地震(M7.9)、1974年の伊豆半島沖地震(M6.8)、1978年の伊豆大島近海地震(M7)などで報告<sup>5)</sup>されており、近年では1995年の阪神淡路大震災(M7.3)、2000年の三宅島群発地震(M6)、同じく2000年の鳥取県西部地震<sup>6)</sup>(M7.3)、2001年の芸与地震<sup>7)</sup>(M6.7)において多くの落石災害が発生している。さらに2003年9月に北海道十勝沖で発生した地震(M8)が記憶に新しいが、この際にも落石災害が発生している<sup>8)</sup>。このように、地震に伴う落石は多数記録されている。

さて、現在のわが国の社会経済情勢をみると、少子高齢化、デフレ基調の不景気、失業者の増加などの深刻な問題に直面しており、国の財政状況も年々悪化の道を辿っている。このため、建設投資予算を削減していかざるを得ず、より効率的、効果的な建設投資手法が求められている。このことは、人々を災害から守る防災分野においても例外ではなく、同様に効率化が求められている。このような社会情勢の中、本研究では防災技術の一つである落石対策技術を取り上げ、より効率的、効果的な対策工が計画できるよう対策工の位

置やその規模を予測する方法を確立することを課題とする。その内容は、通常用いられる設計手法<sup>5)</sup>では取り扱いが困難な地形や斜面性状の複雑な変化などの要因を考慮できる数値解析手法を開発し、落石対策工の設計に必要な情報を得ようとするものである。

## 1.2 本研究の目的と意義

落石に対する防護構造物の設計に際しては、構造物の強度、規模（高さ）および位置を決定するため、次のような条件を必要とする。

- (1) 落石到達範囲の水平方向への広がり（防護工の位置と延長）
- (2) 落石が防護構造物の位置に達した時の落石の運動形態（飛躍高さなど）
- (3) 落石が防護構造物に衝突する時に防護構造物に与える衝撃力（エネルギー）

このような条件を決定するためには、

- (a) 落石の発生位置と規模
- (b) 落石の到達域
- (c) 斜面の状態を考慮した落石の運動形態と落石エネルギー

を特定する必要がある。

(a) に対しては、第2章に述べる現地調査が有効な手段となる。(c) に対しては、防護工へ作用するエネルギーの算定については、調査より明らかとなる危険性のある落石の大きさや斜面勾配、植生等をもとに経験則によって決定される。しかしながら、(b)(c)の落石の最終到達位置や飛行運動を含む落石の運動エネルギーを算定する方法は確立されているとは言い難い。つまり、落石を質点あるいは剛体と見なした2次元解析手法<sup>9),10)</sup>が提案されているが、2次元解析は、ある断面線上でのモデルにしか過ぎないため、軌跡の水平方向への広がりを表現できない。したがって、3次元解析が有効といえる。このような観点から、3次元解析法の開発を試みた例<sup>11)</sup>は散見できるが、現状では依然として、2次元解析が主流である<sup>12)</sup>。さらに、設計に際しては、落石の運動エネルギーを決定する際に、まず、質点の力学に基づいて並進運動エネルギーを求め、それに定数を乗じて回転運動エネルギーを算出する方法が採用されている<sup>5)</sup>。しかし、回転エネルギーは落石の形状によって大きく異なることが予想されるので、剛体の力学に基づいて算出する方がより合理的であると考えられる。

本研究では、自然斜面の不均質性を考慮した3次元斜面のモデル化を行い、個別要素法<sup>13)</sup> (DEM) を用いた落石軌跡のシミュレーション解析を行う。そして、個々の現場において最も合理的な対策工が計画できるような方策を提示することを目的とする。

個別要素法 (DEM) を用いれば、落石を形状のある物体として、飛行、衝突、すべり、

ころがりなどのすべての運動形態を計算により求めることができることから、より現実に近い落石の運動解析が可能となる。これまでの落石対策工の設計は、現場実験から得られた経験則を用いて、原地形を単純化し、落石エネルギー等を算出する方法を採っているが、個別要素法（DEM）のシミュレーションによれば、経験則では知ることのできなかつた落石の挙動や運動エネルギーの変化を明らかにすることができ、落石対策検討上必要な情報（落石到達位置や落石エネルギーの推移など）が得られると考える。

地盤工学の分野では自然界のものを対象とするため、土質定数などの地盤特性は不均質なものであり、常に値にばらつきを有している。これを、信頼性設計の概念でとらえようとする考え方<sup>14)</sup>がある。これは、たとえば、ある定数で安定計算を行い、所定の安全率を満足したとしても、その定数自体にばらつきがあるために、破壊する危険性もあるということを確認的に示すという考え方である。本研究においては、斜面性状などの不均質さを、解析定数をモンテカルロ法により変化させることにより表現できるようにしている。すなわち、図 1.2.1 に示すように、不確実性の要因を決定し、それに数多くの試行計算によってばらつきを与えられるような解析手法を採っている。その結果、多くの計算結果が出力されることになる。この統計量ともいえる多数の計算結果を確率論的に取り扱えば信頼性設計にも結びつくものだと考えている。

落石の危険度を検討する場合、どの位置が落石の発生源であるかは現地調査により比較的容易に判断できるが、それが、いつ落石となり、どのような位置に転がっていくかを判断するのは非常に難しい。この内、どの位置にどの程度落石が転がり落ちるか、その跳躍高さ、エネルギー等をシミュレーションによって確率論的に論ずることができれば合理的な設計手法に繋がると考えている。解析定数を確率論的手法で設定する試みの報告<sup>7)</sup>はあるが、本研究では、この解析定数を2つの範疇に種別した導入を試みている。その1つは、地表面の摩擦係数のように自然界の不均質性により確定できないものを、ある領域内で確率論的にランダム（random）に取り扱うことである。もう1つは、落石の質量や初期位置のように詳細な調査によれば確定できるが、初期段階では未知（unknown）として、ある値を仮定して取り扱うものである。

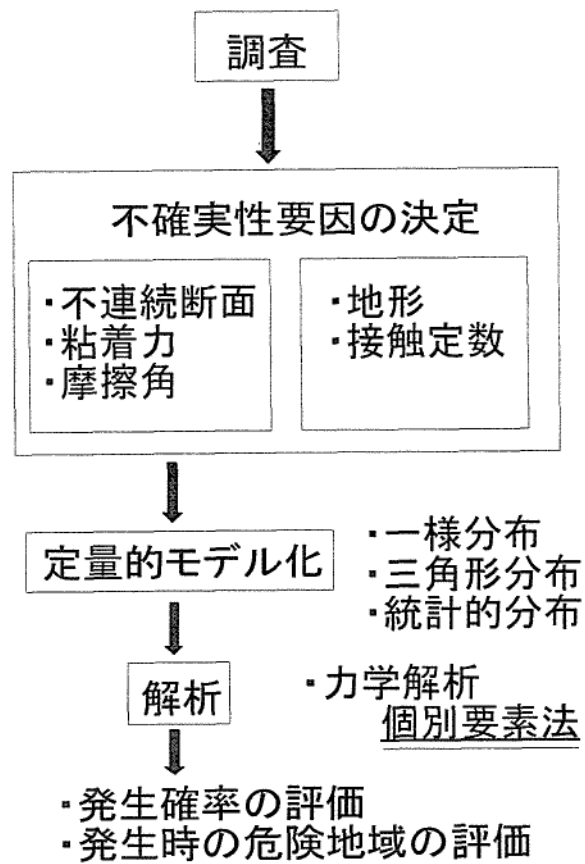


図 1.2.1 落石シミュレーションのフロー

### 1.3 本論文の構成

第1章では、本研究の背景と意義について述べた。

第2章では、まず、落石の定義と落石発生の素因についてまとめ、さらに、落石の危険度評価のための調査手法を述べている。加えて、鳥取県内の地形地質と落石の関連について考察し、落石発生源の調査解析例を紹介している。これは、本章冒頭に述べた落石危険箇所などが鳥取県内には依然として数多く残されている例を示すものとなっている。

第3章では、落石の運動形態についてまとめるとともに、防護工設計に関連する因子の導出について述べている。さらに、既往の落石実験結果<sup>15)16)17)</sup>を示し、現状の防護工の設計手法との問題点について記述している。そこでは、質点系解析法に基づく設計手法とその問題点を論ずる。

第4章では、第3章で述べた問題点に対する一方策として、本研究で開発した個別要素法による3次元落石シミュレーション法とその適用について述べている。この中では解析の重要なパラメータである粘性減衰係数を反発係数というわかり易い概念を用いて決定できることを室内実験によって検証している。そして、この手法を用いて単純斜面モデルでの落石解析を行い、落石運動の基本的な性質について考察している。さらに、自然斜面の不均質さを種々の解析定数（減衰係数や摩擦角など）をモンテカルロ法により、ばらつきを与えることにより表現できることを示し、その適用例について述べている。

第5章では、第4章に述べた解析手法を適用した事例とその検討結果を述べている。ここでは、谷地形および尾根地形を選び、岩塊の到達域や運動エネルギー、跳躍高さを照査している。そして、その結果を対策工計画の際に、どのように適用させるかについての考え方を述べている。

第6章では、第2章から第5章に述べる内容を総括して本論文の結論とする。

## 参 考 文 献

- 1) 山岸宏光：北海道における最近の二つの岩盤崩落について，岩の力学ニュース，No.49，pp.3-5，1998.
- 2) 山本哲朗，原田 宏，寺山 崇，吉原和彦，勝部安昭，宮崎晃一：2001年芸予地震により発生した山口県内の斜面災害特性，土と基礎，Vol.51,No.11，pp.29-31，2003.
- 3) 三木博史：岩盤・斜面崩壊のリスクマネジメント技術の開発，土木学会誌，Vol.87，No.5，pp.37-40，2002.
- 4) 国土交通省河川局編：近年の豪雨災害に見る大雨発生の条件，PORTAL，no.025，2003.6
- 5) 日本道路協会編：落石対策便覧，pp.244-251，2000.
- 6) 田近 淳，伊藤陽司：2003年十勝沖地震により発生したランドスライド，日本地すべり学会誌：vol.40，No.4，pp79-81，2003.
- 7) 谷口洋二，西村 強，精山誉志，木山英郎：鳥取県西部地震で発生した落石と3次元個別要素解析例，第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp401-406，2003.1
- 8) 芸予地震災害緊急調査団：平成13年芸予地震災害緊急調査速報，土と基礎，Vol.49,No.6，pp.35-38，2001.
- 9) Spang, R.M. : Optimized Rockfall Protection by 'ROCKFALL', Proceedings of 8<sup>th</sup> International Congress on Rock Mechanics, ISRM, Vol. 3, pp.1233-1242,1997
- 10) 鷺田修三，古賀泰之，伊藤良弘：落石運動の予測手法について，第24回土質工学会研究発表会講演集，pp.1611-1614，1989.
- 11) Descoeurs, F. Zimmermann. TH : Three-dimensional Dynamic Calculation of Rockfall, Proceedings of 6<sup>th</sup> International Congress on Rock Mechanics, ISRM, Vol. 1, pp.337-342.
- 12) 佐々木哲也，倉岡千郎，古賀泰之，三木 茂：落石対策，落石運動のメカニズム（その2），土と基礎，Vol50，No.4，pp.48-53，2002.
- 13) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. Symposium on rock mechanics. Nancy. Vol. 2, pp.129-136，1971.
- 14) 松尾 稔：地盤工学－信頼性設計の理念と実際，技報堂出版，pp.19-26，1984.
- 15) 日本道路公団東京支社・(株)建設企画コンサルタント：落石実験調査報告書，1973.
- 16) 佐々木康，谷口栄一：落石の跳躍量に関する実験，第14回日本道路協会論文集，pp.113-115，1981.
- 17) 右城 猛，村上哲彦：落石の飛躍高の推定，第1回落石の衝撃力およびロックシェットの設計に関するシンポジウム論文集，pp48-54，1983.

## 第2章 落石の発生形態と事例

### 2.1 はじめに

本章では、まず、研究の対象とした落石の定義と落石発生の素因について述べる。ついで、落石の危険度評価のための調査手法を述べ、さらに、鳥取県内の地形地質と落石の関連についてとりまとめ、特に、地形の特徴と不連続面に注目した落石発生源の調査解析結果について述べる。本研究の目的は落石の挙動推定であるが、本章で述べる落石の基本的な特性の理解と落石発生の危険性についての詳細な調査はその基本である。

### 2.2 落石の定義と崩壊性地形

「落石対策便覧」<sup>1)</sup> (日本道路協会) によれば、落石とは次のように定義されている。

「落石とは岩盤の不連続面（岩盤中に発達する節理・片理・層理等の割れ目）が拡大して、岩塊や礫がはく離したり、表層堆積物、風化岩、火山噴出物、固結度の低い砂礫層中の岩塊、礫が表面に浮き出して斜面より落下する現象をいう。落下した岩塊等も落石といふことが多い。」

すなわち、斜面風化や雨水などにより、それまで固定していた岩石が分離し一物体となり、自由落下したり斜面を転がり落ちる現象、またはその落下した物体を落石という。

図 2.1.1 に土砂災害の分類を示すが、これによると、落石は広義の崩壊に属し、のり面・斜面崩壊、岩盤崩壊と並んで分類されている。しかしながら、これら3者を明確に区別することは困難である。岩石が単体もしくは複数個移動する場合は明確に落石と定義できるが、崩壊に伴って発生する土砂や岩石の移動の場合は、崩壊と落石の区分はできず、落石をともなった崩壊と表現せざるを得ない。実際は、このような中間的な性格の落石が多く発生している。本論文では、斜面から分離し、一物体となった落石の運動現象を研究対象にしている。

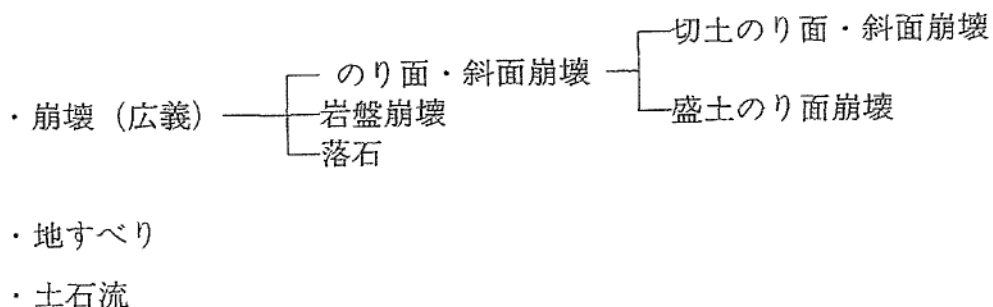


図 2.2.1 土砂災害の分類<sup>1)</sup>

次に、落石を伴う崩壊性要因を持つ地形の代表例を道路防災総点検要領<sup>2)</sup>より引用して示す。また、実際の地形解析例は2.7に述べている。

### ①崖錐地形

山腹斜面下部（山裾）の傾斜が急に緩くなっている斜面をいう。崖錐斜面は急斜面上の風化層が重力の作用により落下して堆積したもので、礫質でルーズな堆積物からなることが多い。

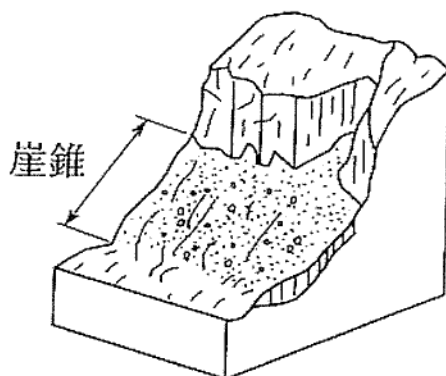


図 2.2.2 崖 錐

### ②段丘崖

丘陵地の縁辺部（台地の裾部）または河川や海岸にほぼ平行する階段状の地形（段丘）の周縁部（段丘崖）を指す。これらの斜面の上部は平坦となることが多い。

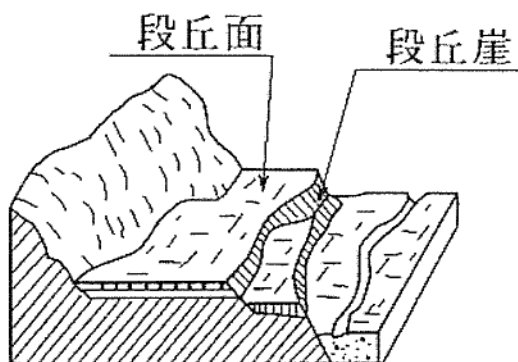


図 2.2.3 段丘崖



### ③崩壊跡地

崩壊跡地，土石流跡地，谷頭，スプーンなどが見られる斜面やその下部を指す。

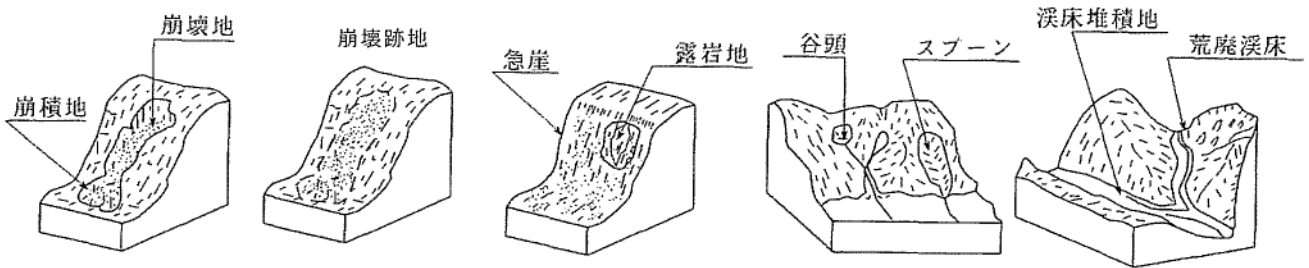


図 2.2.4 崩壊跡地

### ④明瞭な遷急線

斜面上方から見て勾配が緩から急に変わる点を結んだ線が遷急線である。一般に遷急線が明瞭なほど浸食崩壊が著しい。遷急線は一本とは限らないので最も明瞭な遷急線に着目する。

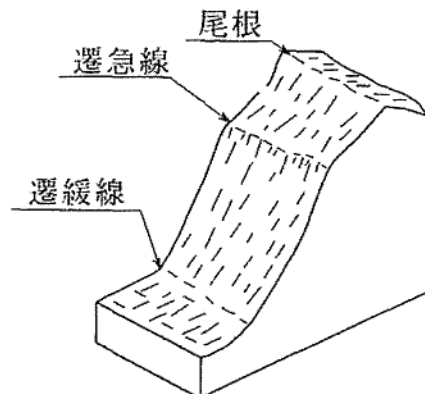


図 2.2.5 遷急線

### ⑤著しい脚部浸食

河川が屈曲して斜面の脚部を著しく浸食している部分（攻撃斜面）では斜面が一般に露岩あるいは裸地となっている。また，波浪による浸食で斜面の脚部を著しく浸食している部分（海食崖）でも同様である。

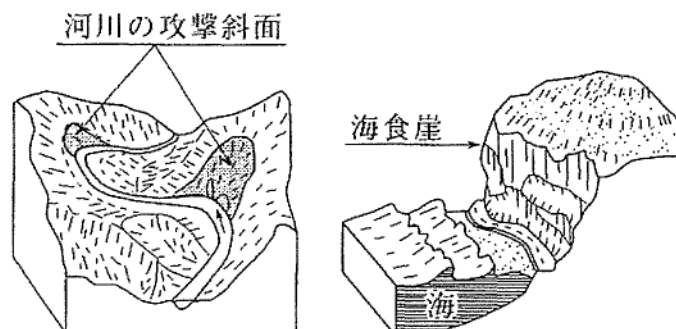


図 2.2.6 脚部浸食が著しい斜面

### ⑥オーバーハング

表土や岩盤が3次元的に凹凸に富み部分的にオーバーハング（傾斜が $90^\circ$ 以上）している場合に相当する。

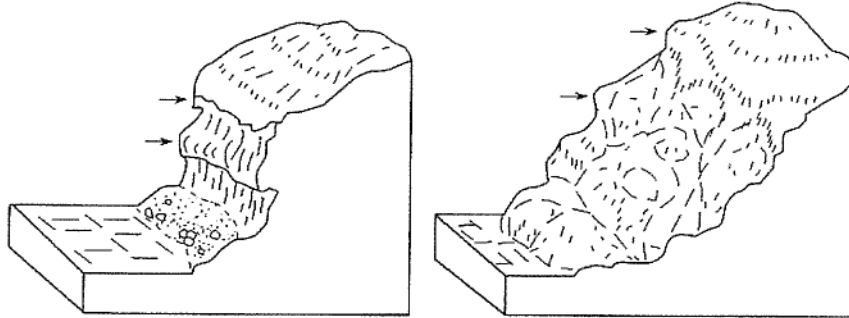


図 2.2.7 オーバーハング

### ⑦集水型斜面

斜面型が盆状に広がり、その流下域が狭い場合を指す。

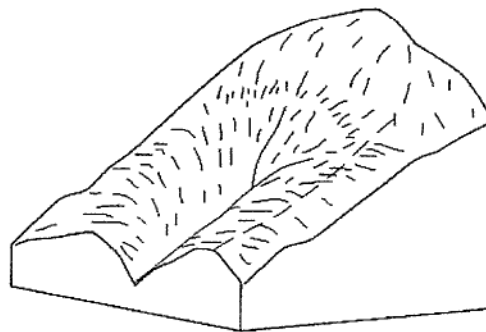


図 2.2.8 集水型地形

## 2.3 落石の発生形態

落石の発生形態は、主に抜落ち（転石）型落石とはく離（浮石）型落石の2形態に分類される。以下に、それらの落石形態について要約して示す。

### 2.3.1 抜落ち（転石）型落石

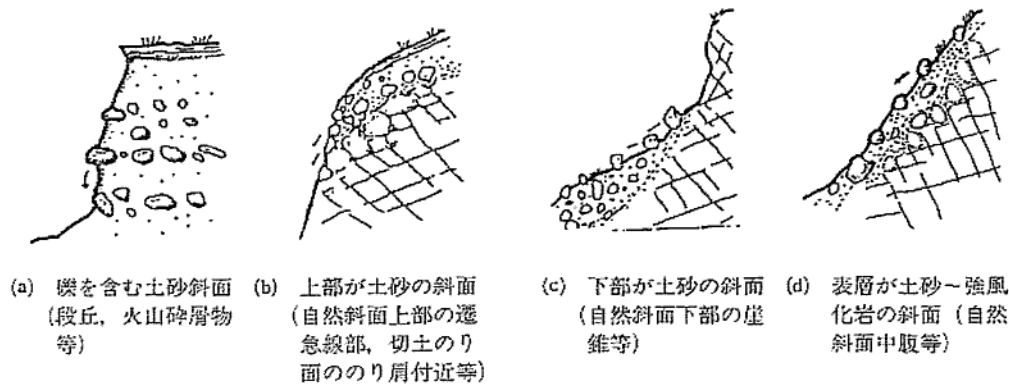


図 2.3.1 抜落ち（転石）型落石の発生形態<sup>1)</sup>

抜落ち（転石）型落石は図 2.3.1 に示すように分類される。抜落ち型落石は、すでに落石となりうる転石形状の物体が存在しており、これが何らかの要因（浸食など）によって落下するものである。

次に、抜落ち型落石の鳥取県内での事例を地質との関連において、写真 2.3.1～2.3.6 に示す。写真 2.3.1 は崖錐土中に見られる大礫である。崖錐土層は礫の周辺が未固結土であるため、容易に礫が抜け落ち落石となる（図 2.3.1 c の例）。写真 2.3.2 安山岩の風化残留岩塊が露頭する地域である。これは、岩体の風化過程で岩芯が残り、転石群が形成された特異な地域である（図 2.3.1 d の特殊な例）。写真 2.3.3 は大山周辺の火砕流堆積物である。礫間土の固結度が低いため礫が抜け落ち易い（図 2.3.1 a の例）。写真 2.3.4 には火砕流層に径 1m 以上の大きな礫が存在することを示した。写真 2.3.5 は斜面に停止した大きな転石である。古生層千枚岩が分布する地域は落石が多く、このような再活動の危険性のある転石がよく見られる。写真 2.3.6 は段丘層の円礫である。段丘礫層は礫が容易に抜け落ちるため落石の危険性が高い（図 2.3.1 a の例）。



写真 2.3.1 崖錐土中の大礫（鳥取県淀江町）

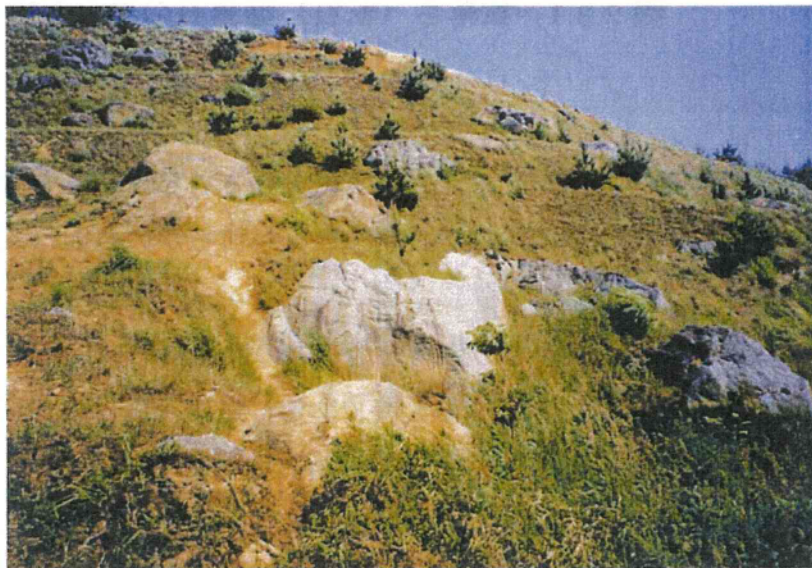


写真 2.3.2 安山岩の風化残留岩塊（鳥取県泊村）





写真 2.3.3 礫主体の火砕流（鳥取県名和町）



写真 2.3.4 火砕流層中の巨礫（鳥取県名和町）



写真 2.3.5 古生層千枚岩地帯の大転石 (鳥取県佐治村)



写真 2.3.6 段丘層の円礫 (鳥取県米子市)



### 2.3.2 はく離（浮石）型落石

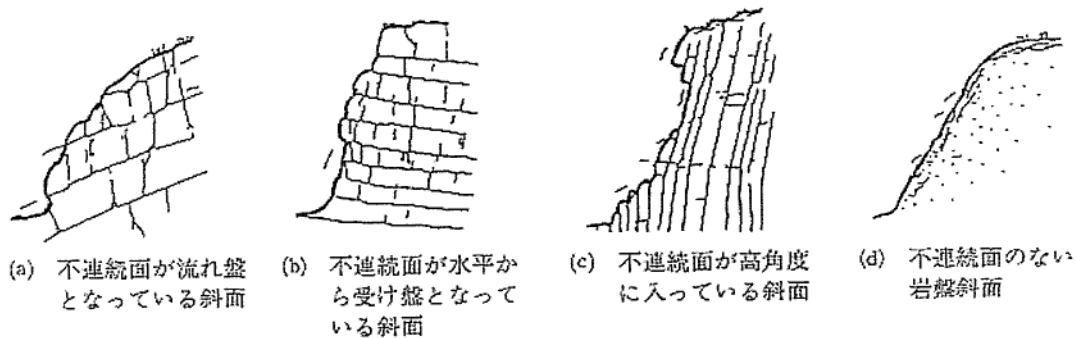


図 2.3.2 はく離（浮石）型落石の発生形態<sup>1)</sup>

はく離（浮石）型落石は、風化や浸食作用を受けて緩んだ斜面上の岩石が岩盤から分離して、落下する現象である。割れ目（節理、層理などの不連続面）の発達した急傾斜の岩盤斜面で発生しやすい。規模の大きな場合は岩盤崩壊に分類される。

次に、はく離型落石の鳥取県内での事例を地質との関連において、写真 2.3.7～2.3.16 に示す。写真 2.3.7 は、はく離寸前の千枚岩の岩塊である。千枚岩は剥離性に富むため、大径の落石が生じやすい（図 2.3.2 c の例）。写真 2.3.9 は花崗岩岩塊の抜落ち跡である。花崗岩は節理に沿った抜け落ち型の落石が生じやすい（図 2.3.2 b の例）。写真 2.3.11, 2.3.12 は鳥取県西部地震時の大規模岩石崩壊である。地震時には大規模岩石崩壊に伴う巨大な落石が発生することがある（図 2.3.2 b, c の例）。この例は 2.7.1 に述べる。写真 2.3.13 は亀裂が発達し不安定化した大岩塊（中生代・凝灰岩）である（図 2.3.2 a の例）。図 2.3.3 はその模式断面であるが、不安定化した岩塊の下方には鉄道が走り、危険な状態にある。

（この箇所は、現在は対策工が施工されている）図 2.3.4 は、この岩塊のスケッチ図である。水平方向の亀裂には岩塊が移動したような痕跡があり、危険度が高いことがわかる。写真 2.3.14 は 風化花崗岩の斜面崩壊である。風化の進行した花崗岩斜面で崩壊が発生し、残留岩塊が落石となることが多い（図 2.3.2 d の例）。写真 2.3.15 は花崗岩の切土斜面である。斜面上に残留岩塊が点在し、落石の恐れがある。写真 2.3.16 は花崗岩の上の玄武岩である。このような地質構造のときには、地質境界（不連続面）に沿って大規模な崩壊とそれに伴う落石が発生しやすい。このような地質構造において上位の玄武岩に亀裂が発達している場合は、落石供給源となることが多く、注意を要する。2.7.1 に同様な地質構造で発生した岩石崩壊例を示している。



写真 2.3.7 はく離寸前の岩塊（千枚岩）（鳥取県佐治村）



写真 2.3.8 写真 2.3.7 の崩壊した岩塊





写真 2.3.9 岩塊のはく離跡（花崗岩）（鳥取市）



写真 2.3.10 上箇所部落石（鳥取市）



写真 2.3.11 地震時の大規模岩石崩壊（鳥取県溝口町）



写真 2.3.12 上箇所の大落石







写真 2.3.14 風化花崗岩の斜面崩壊（鳥取県西伯町）



写真 2.3.15 花崗岩の切土斜面（鳥取県西伯町）



写真 2.3.16 花崗岩の上ののる玄武岩（鳥取県会見町）



## 2.4 落石発生と地質・地形との関連

### 2.4.1 地質と落石の関係

図 2.4.1 は池田・小橋<sup>3)</sup>が地質と落石発生の関係をまとめたものであるが、これによると古生層での落石がもっとも多くなっている。これは、古生層には不連続面の発達した粘板岩、千枚岩、石灰岩が多いことからだと見える。次に花崗岩が多いのは、花崗岩は節理が発達していたり、表層風化が激しいためと考えられる。著者も両地質地帯での落石を経験しているが、地質と落石の頻度については地質分布の地域性を考えると、それぞれの地域において固有の特徴があると考えられる。鳥取県の地質と落石の関係については、2.6 以降に述べる。

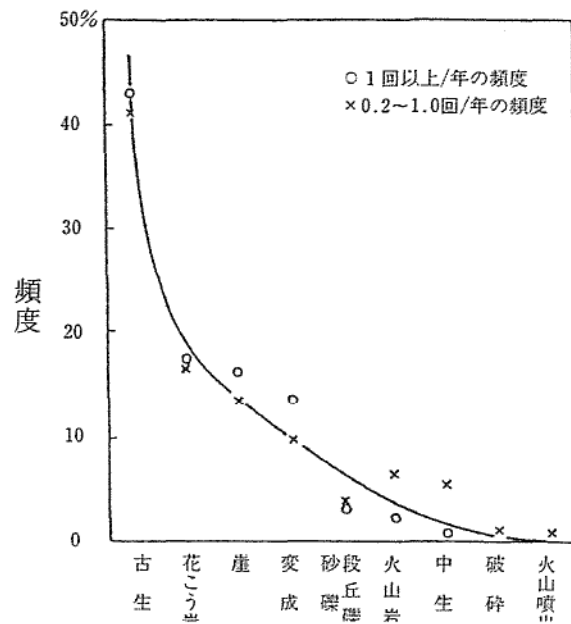
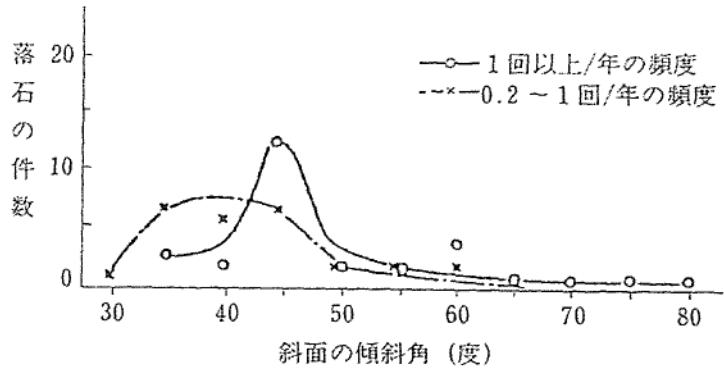


図 2.4.1 地質と落石の関係<sup>3)</sup>

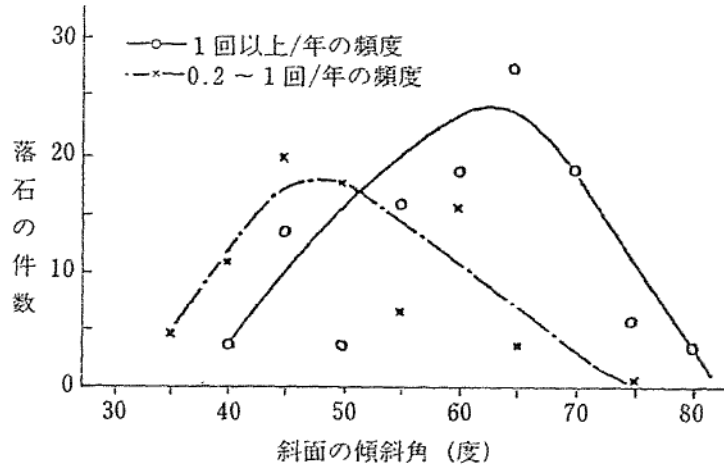
### 2.4.2 斜面傾斜角と落石の関係

図 2.4.2 は同じく池田・小橋<sup>3)</sup>のまとめた斜面傾斜角と落石発生の関係図である。図は落石の年間発生頻度毎にまとめているが、落石頻度の高いデータをみると、転石型の落石では斜面傾斜角度が 35~50° の斜面に発生件数が多く、それ以上やそれ以下の斜面勾配では発生件数が非常に少なくなる。一方、浮石型の場合は 45° 以上になると発生件数が多くなる。以上のような傾向は、落石の発生形態の項で例示したように転石型の落石は斜面を構成する地質が崖錐や風化土・火砕流などの固結度の低い、いわゆる土砂斜面で発生しやすいこと、浮石型（はく離型）の落石は急勾配の岩盤斜面で発生しやすいことを示している。

といえる.



(1) 転石型の落石



(2) 浮石型の落石

図 2.4.2 傾斜角と落石発生の関係<sup>3)</sup>

### 2.4.3 気象現象と落石の関係

落石の誘因としては、降雨、凍結融解、風などの気象現象や地震、振動などの人為的誘因などが挙げられる。これらの内、気象現象と落石発生に関して考察する。

図 2.4.3、図 2.4.4 はある地域の降雨と落石発生との関係をまとめたもの<sup>3)</sup>である。これによると、寒冷地の場合は、冬期から春にかけての凍結融解時期に落石が増加していること、温暖多雨地の場合は、雨量の多い夏期に落石個数が多くなることがよく分かる。しかし、鳥取県のような日本海側では、冬期が寒冷でしかも温暖多雨の梅雨期と台風期をもつため、両特性を併せた厳しい気象条件下にある地域といえる。

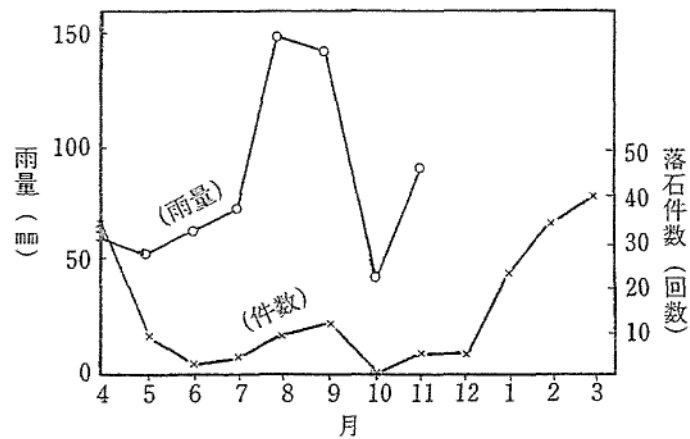


図 2.4.3 落石発生件数と降雨の関係<sup>3)</sup>  
(寒冷地の場合)

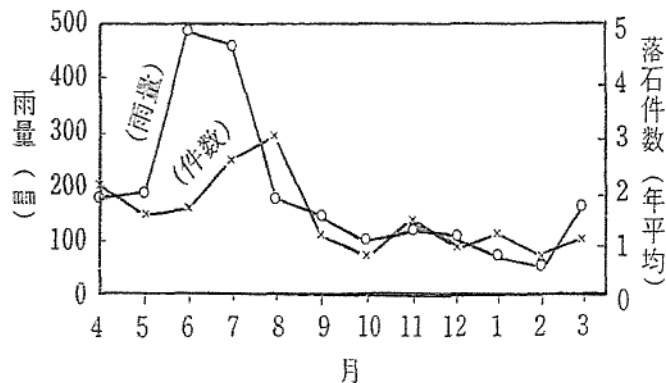


図 2.4.4 落石発生件数と降雨の関係<sup>3)</sup>  
(温暖多雨地の場合)



#### 2.4.4 地形的特徴

図 2.4.5, 図 2.4.6 は伊豆大島近海地震 (1978 年 1 月  $M=7.0$ ) における落石災害を調査し, まとめられた地形的特徴<sup>1)</sup>である. これによると, 地形の変化点で (遷急点) で落石が発生しやすいことがよく分かる. 2.7 に述べるが鳥取県西部地震 (2000 年 10 月  $M=7.3$ ) による大規模落石においても同様に地形の遷急点が落石発生位置となっている. 地形の遷急点は浸食前線ともいえるため, 地震以外の誘因で発生する落石もこのような箇所が発生することが多いと考えられる.

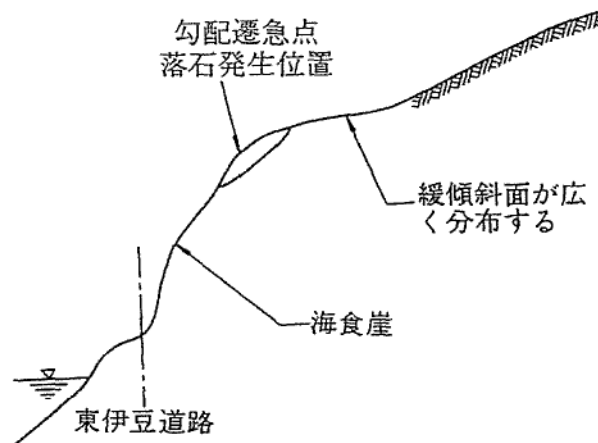


図 2.4.5 地形的特徴 1<sup>1)</sup>

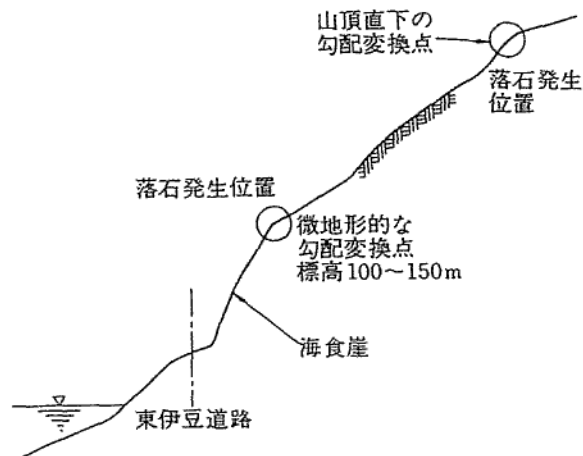


図 2.4.6 地形的特徴 2<sup>1)</sup>

## 2.5 落石の安定度調査

落石発生 の安定度調査は一般的に、その目的によって概査と精査に区分されている。

概査とは比較的広い領域、たとえばある山間部の道路路線全体などにおいて、落石の可能性や精査の必要性等、防災計画のための基礎資料を得る目的で行う。

概査の主な調査項目は表 2.5.1 に示すとおりであり、机上調査と簡単な現地踏査を主体とする。

表 2.5.1 概査の主な調査項目<sup>1)</sup>

概 査	基本調査 段階	資料調査	防災総点検資料・防災カルテ・データベース・地形図・地質図・土地利用図・災害等報告記録
		空中写真判読	1/10,000 程度の空中写真を用いて判読
	安定度 判定段階	現地踏査	資料調査・空中写真判読結果を基にした危険箇所等の簡便なチェック
		その他の調査	斜面調査用簡易貫入試験等の原位置試験
		斜面区分	単位斜面のさらなる詳細区分を行う
安定度判定	崩壊性要因を持つ地形等 10 項目を目安		

精査とは、概査や維持管理点検などにより詳細に検討する必要があると判断された場合、あるいは実際に落石が生じた場合において、対策を念頭におき、落石のメカニズムや斜面の安定度を解明するために行うものである。

精査の主な調査項目は表 2.5.2 に示すように、詳細踏査やボーリング調査、変状観測などを主体とする。

表 2.5.2 精査の主な調査項目<sup>1)</sup>

精 査	第 1 次精査 段階	測 量	1/1,000～1/100 程度
		リモートセンシング	詳細空中写真等
		詳細地表踏査	浮石・軽石の位置・規模・不安定度・岩盤亀裂分布
	第 2 次精査 段階	物 理 探 査	弾性波探査・電気探査・電磁波探査等
		ボーリング・サウンディング	ボーリング・サウンディング・孔内測定等
	観 測 段 階	岩石試験・土質試験	強度試験、変形試験、密度試験等
		施工前・施工中観測	施工時等の変状を観測するもの
施工後観測	施工後の変状を観測するもの		

落石の危険性を判定することは実際には、非常に難しいものであり、現在のところ確立された方法はなく、様々な方法が提案されている。そして、その多くが道路防災点検<sup>2)</sup>で採用されているような現地踏査による安定度調査表の作成により落石の危険性を評価している。この段階において岩盤崩壊の危険性などが指摘された場合はボーリング調査、ポアホールカメラによる不連続面の解析などが必要となってくる。図 2.5.1、図 2.5.2 に安定度評価の例を示し、表 2.5.3、表 2.5.4 に評価手法および評価表の例を示す。

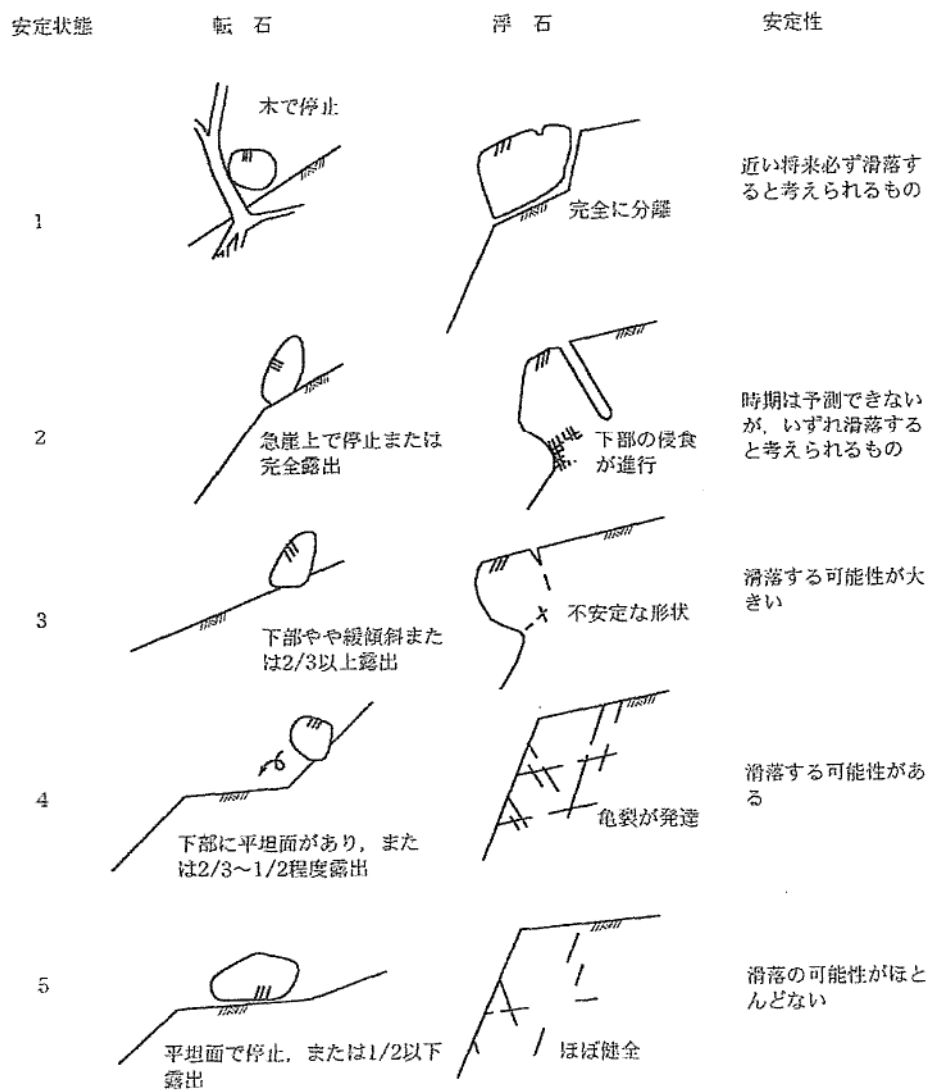


図 2.5.1 現地観察による安定度評価の一例<sup>1)</sup>

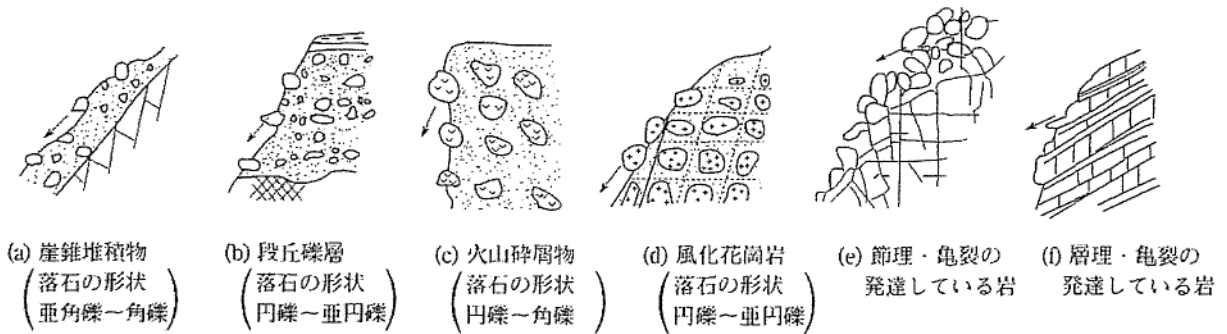


図 2.5.2 支持状態が不安定な浮石・転石の例<sup>2)</sup>

表 2.5.3 浮石・転石の安定度評価手法<sup>2)</sup>

評 価	《表土層》	《浮石・転石》
『不安定』	<ul style="list-style-type: none"> <li>表土層が厚く(50cm程度以上)表層の動きが見られたり、浸食を受けている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>以下のようなものが多数散在する場合。</li> <li>①直径のほぼ2/3以上が地表から露出するもの。</li> <li>②完全に浮いており、人力で容易に動く判断されるもの。</li> </ul>
『やや不安定』	<ul style="list-style-type: none"> <li>表土層が厚くても表層の動きや浸食が見られない。</li> <li>表土層は薄い、動きや浸食の可能性はある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>上記①②のようなものが少ない。</li> <li>露出の程度が小さい。</li> <li>やや浮いてはいるが、人力では動かさない。</li> </ul>
『安定』	<ul style="list-style-type: none"> <li>表土層が薄いかほとんどなく植生状況からも表層の動きがない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>浮石・転石がない。</li> <li>あっても比較的安定しているもの。</li> </ul>

表 2.5.4 安定度調査表

点検者		所属機関																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
<p>【要因】(Ai)</p> <table border="1"> <tr> <th>項目</th> <th>要因</th> <th>面</th> <th>の</th> <th>評</th> <th>点</th> <th>区</th> <th>分</th> <th>面</th> <th>評</th> <th>点</th> </tr> <tr> <td>地</td> <td>G 1: 崖地形</td> <td>3</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>3</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>地</td> <td>G 2: 崩壊跡地</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>G 3: 谷地の裾部、脚部改良、</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>G 4: 尾根先端など凸凹斜面、</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>浸食に弱い土質</td> <td>8</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>8</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>水を含むと強度低下しやすい土質</td> <td>4</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>4</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>割れ目や間隙の密度が高い</td> <td>12</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>12</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>浸食に弱い軟岩</td> <td>6</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>6</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>風化が速い岩質</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>流れ壁(管理面、納線)</td> <td>8</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>8</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>不透水性部壁、土の土砂</td> <td>6</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>6</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>上部が硬質/脚部が脆弱な岩</td> <td>4</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>4</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>その他</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>不安定</td> <td>12</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>12</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>やや不安定</td> <td>6</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>6</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>安定</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>湧水あり</td> <td>8</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>8</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>しみ出し程度</td> <td>4</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>4</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>なし</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>裸地~植生(草木)</td> <td>5</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>5</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>雑草(植生、雑草、木本)</td> <td>3</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>3</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>構築物主体</td> <td>1</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>1</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>H &gt; 30m</td> <td>18</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>18</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>30 ≤ H ≤ 50m</td> <td>15</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>15</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>15 ≤ H &lt; 30m</td> <td>10</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>10</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>1 ≤ H &lt; 15m</td> <td>5</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>5</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>H ≥ 50m</td> <td>18</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>18</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>30 ≤ H &lt; 50m</td> <td>16</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>16</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>15 ≤ H &lt; 30m</td> <td>12</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>12</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>H &lt; 15m</td> <td>10</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>10</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>植栽該当・明瞭なものあり</td> <td>12</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>12</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>あり・不明瞭なもの</td> <td>8</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>8</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>なし</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>植栽該当・明瞭なものあり</td> <td>5</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>5</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>あり・不明瞭なもの</td> <td>3</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>3</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>質</td> <td>なし</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>0</td> <td>評</td> <td>点</td> <td>配</td> <td>点</td> <td>評</td> <td>点</td> </tr> <tr> <td>性</td> <td>合計</td> <td colspan="2">のり面</td> <td>点</td> <td>(A1)</td> <td colspan="2">自然斜面</td> <td>点</td> <td>(A2)</td> <td>点</td> <td>(A2)</td> </tr> </table>				項目	要因	面	の	評	点	区	分	面	評	点	地	G 1: 崖地形	3	評	点	3	評	点	配	点	評	点	地	G 2: 崩壊跡地	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点	性	G 3: 谷地の裾部、脚部改良、	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点	質	G 4: 尾根先端など凸凹斜面、	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点	性	浸食に弱い土質	8	評	点	8	評	点	配	点	評	点	質	水を含むと強度低下しやすい土質	4	評	点	4	評	点	配	点	評	点	性	割れ目や間隙の密度が高い	12	評	点	12	評	点	配	点	評	点	質	浸食に弱い軟岩	6	評	点	6	評	点	配	点	評	点	性	風化が速い岩質	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点	質	流れ壁(管理面、納線)	8	評	点	8	評	点	配	点	評	点	性	不透水性部壁、土の土砂	6	評	点	6	評	点	配	点	評	点	質	上部が硬質/脚部が脆弱な岩	4	評	点	4	評	点	配	点	評	点	性	その他	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点	質	不安定	12	評	点	12	評	点	配	点	評	点	性	やや不安定	6	評	点	6	評	点	配	点	評	点	質	安定	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点	性	湧水あり	8	評	点	8	評	点	配	点	評	点	質	しみ出し程度	4	評	点	4	評	点	配	点	評	点	性	なし	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点	質	裸地~植生(草木)	5	評	点	5	評	点	配	点	評	点	性	雑草(植生、雑草、木本)	3	評	点	3	評	点	配	点	評	点	質	構築物主体	1	評	点	1	評	点	配	点	評	点	性	H > 30m	18	評	点	18	評	点	配	点	評	点	質	30 ≤ H ≤ 50m	15	評	点	15	評	点	配	点	評	点	性	15 ≤ H < 30m	10	評	点	10	評	点	配	点	評	点	質	1 ≤ H < 15m	5	評	点	5	評	点	配	点	評	点	性	H ≥ 50m	18	評	点	18	評	点	配	点	評	点	質	30 ≤ H < 50m	16	評	点	16	評	点	配	点	評	点	性	15 ≤ H < 30m	12	評	点	12	評	点	配	点	評	点	質	H < 15m	10	評	点	10	評	点	配	点	評	点	性	植栽該当・明瞭なものあり	12	評	点	12	評	点	配	点	評	点	質	あり・不明瞭なもの	8	評	点	8	評	点	配	点	評	点	性	なし	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点	質	植栽該当・明瞭なものあり	5	評	点	5	評	点	配	点	評	点	性	あり・不明瞭なもの	3	評	点	3	評	点	配	点	評	点	質	なし	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点	性	合計	のり面		点	(A1)	自然斜面		点	(A2)	点	(A2)
項目	要因	面	の	評	点	区	分	面	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
地	G 1: 崖地形	3	評	点	3	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
地	G 2: 崩壊跡地	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	G 3: 谷地の裾部、脚部改良、	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	G 4: 尾根先端など凸凹斜面、	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	浸食に弱い土質	8	評	点	8	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	水を含むと強度低下しやすい土質	4	評	点	4	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	割れ目や間隙の密度が高い	12	評	点	12	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	浸食に弱い軟岩	6	評	点	6	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	風化が速い岩質	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	流れ壁(管理面、納線)	8	評	点	8	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	不透水性部壁、土の土砂	6	評	点	6	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	上部が硬質/脚部が脆弱な岩	4	評	点	4	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	その他	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	不安定	12	評	点	12	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	やや不安定	6	評	点	6	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	安定	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	湧水あり	8	評	点	8	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	しみ出し程度	4	評	点	4	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	なし	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	裸地~植生(草木)	5	評	点	5	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	雑草(植生、雑草、木本)	3	評	点	3	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	構築物主体	1	評	点	1	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	H > 30m	18	評	点	18	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	30 ≤ H ≤ 50m	15	評	点	15	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	15 ≤ H < 30m	10	評	点	10	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	1 ≤ H < 15m	5	評	点	5	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	H ≥ 50m	18	評	点	18	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	30 ≤ H < 50m	16	評	点	16	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	15 ≤ H < 30m	12	評	点	12	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	H < 15m	10	評	点	10	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	植栽該当・明瞭なものあり	12	評	点	12	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	あり・不明瞭なもの	8	評	点	8	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	なし	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	植栽該当・明瞭なものあり	5	評	点	5	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	あり・不明瞭なもの	3	評	点	3	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
質	なし	0	評	点	0	評	点	配	点	評	点																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
性	合計	のり面		点	(A1)	自然斜面		点	(A2)	点	(A2)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															

【対策工】(B1) = (A1) + α または (A1) × 0

想定される落石・崩壊を十分に予防している、もしくは、それが発生したとしても十分に防護し得る。

想定される落石・崩壊をかなり予防している、もしくは、それが発生した場合、かなり防護しているが万全ではない。

想定される落石・崩壊を一部予防している、もしくは、それが発生した場合、かなり防護しているが、その他に対しては効果がない。

対策がなされていない。

もしくは、なされていても、効果が全くない。

【履歴】(C)

\*最近の対策実施以降、落石・崩壊が当該のり面・斜面等で発生していない場合には、履歴からの評価は実施する必要なし、-1(C)を0点とする。

被災の履歴・程度区分

最近の対策実施、道路交通への支障が生じたことあり。(対策工の効果なし)

交通への支障はないが路面に与える比較的大きな落石・崩壊の履歴あり。

のり面・斜面先にとどまる程度の小規模な落石・崩壊の履歴はあり。(対策工の効果はあるが、追加対策工が必要と思われるもの)

【総合評価】

対	評	判定
対策が必要と判断される。		
防災カルテを作成し対応する。		
特に新たな対応が必要としない。		

【地震時の安定性】

安定	
不安定	

\*地形でG4または浮石・巨石が不安定な場合は、不安定期間に○印をつける

( ) は各項目の満点を示す。

該当する場合は配点欄に○印をつけると共に点数を記入する。

不明な場合は中間的な値を採用する。

【要因】(Ai)

## 2.6 鳥取県内の地質と落石

2章4節において地質と落石発生の関係について一般的な事実を述べた。本節では、鳥取県内の地質と落石との関係について述べる。図2.6.1に鳥取県の地質図を示す。

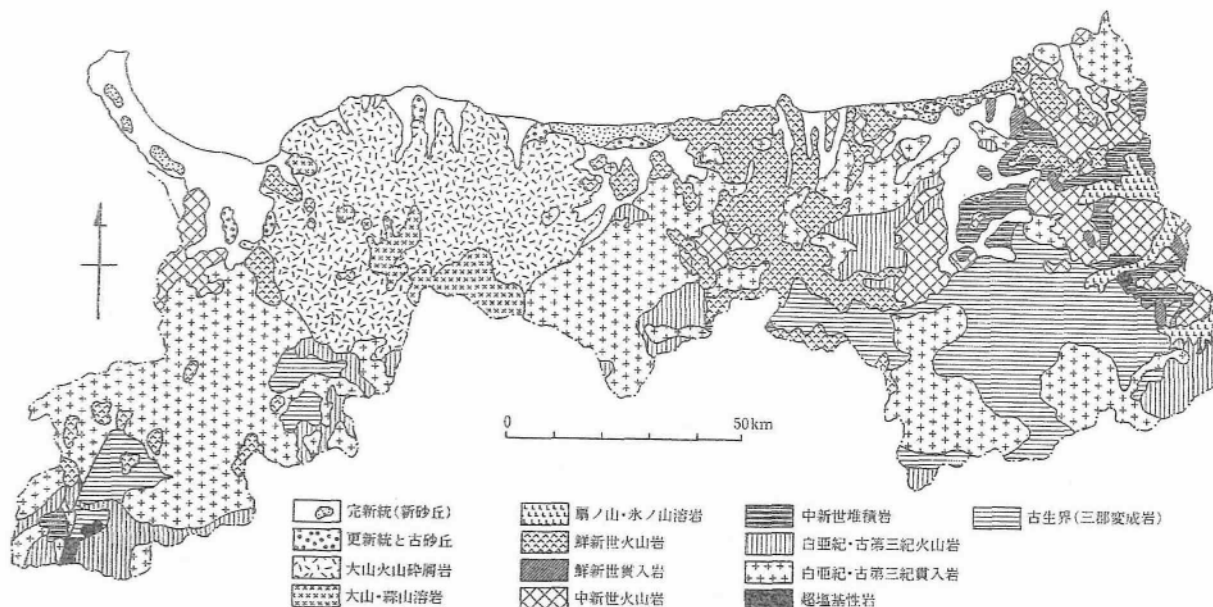


図 2.6.1 鳥取県の地質図 4)

鳥取県の地質はその特徴から、大きく分けると次に示すように区分される。

- ① 県北部の海岸線に沿った中東部の砂丘，西部の弓ヶ浜半島に代表される第四期の砂質系の堆積層
- ② 上記の砂質系堆積層の後背地に分布する軟弱粘性土層
- ③ 県東部に分布する新第三期中新世の固結度の低い堆積軟岩
- ④ 県中部から北部にかけての丘陵を構成する新第三期鮮新世の火山岩類
- ⑤ 県西部の大山周辺に分布する固結度の低い火砕岩類
- ⑥ 県南部の山地を構成する古生層（千枚岩・粘板岩），
- ⑦ 中生代の火成岩（花崗岩）

上記に区分したそれぞれの地質の特徴・特性から，土木地質学的な問題点，たとえば，盛土の安定と沈下，液状化，地すべり等の危険性が推察されるが，落石という観点で捕らえると，各地質は次のような問題点が挙げられる。

- ⑤の大山周辺の火砕岩については，人頭大の礫とその間の未固結の細粒土の組み合わせ

で構成されているため、雨水等の浸食によって人頭大の礫が落石となることが多い。

⑥の古生層の千枚岩、粘板岩については、これらは異方性の岩盤であり、一定方向の面に沿って風化が進み細かい不連続面を形成しやすく、その結果、岩盤が分離されやすくなる。

⑦の花崗岩については、花崗岩特有のシーティング節理の発達や深層風化しマサ土化しやすい等の特徴から、節理による岩石のブロック化と分離、残留岩塊による転石などが落石の原因となる。

以上のことを考慮すると、鳥取県の地質的特徴からみた落石危険地域は、「県西部の大山周辺に分布する固結度の低い火砕岩類分布地域」、「県南部の山地を構成する古生層（千枚岩・粘板岩）分布地域」、「中生代の火成岩（花崗岩）分布地域」であることがわかる。これらの落石危険地域を地質図上にハッチングし、「鳥取県の地質的特徴からみた落石危険地域」を作成し、図 2.6.2 に示す。

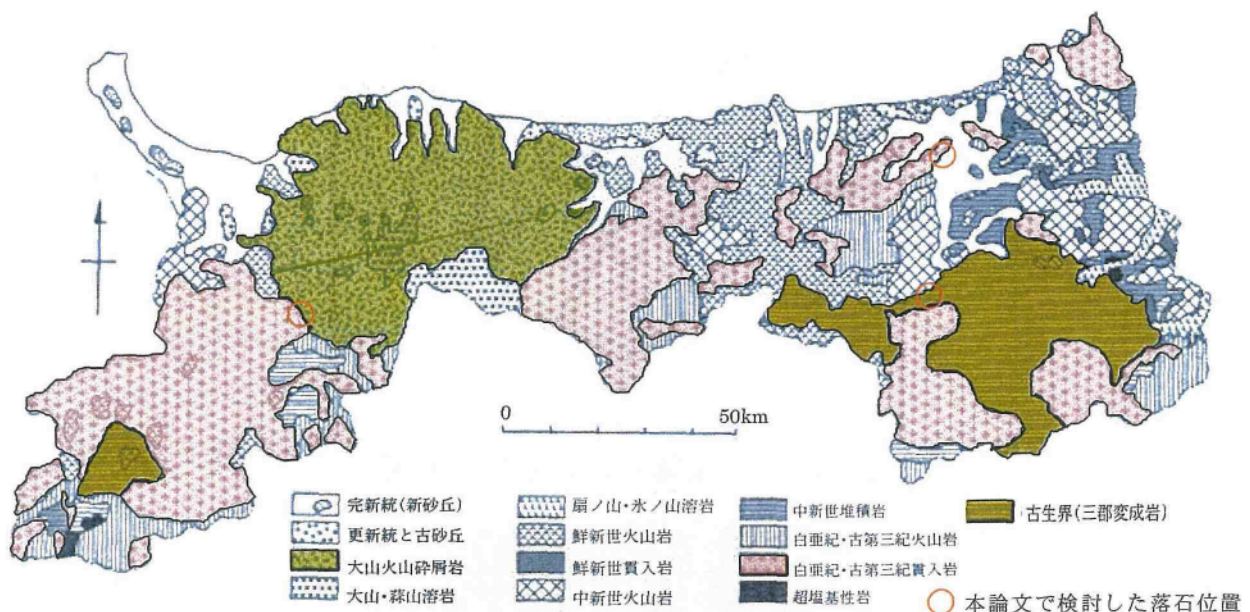


図 2.6.2 鳥取県の地質的特徴からみた落石危険地域

図 2.6.2 をみると、鳥取県内には広範囲にわたって落石危険地域が分布していることがわかる。さらに、落石の危険区域はこの地域以外にも火山岩地域での開口節理を素因とする落石も存在している。このような地質的な観点から抽出された落石危険地域と前述した落石発生箇所の地形的な特徴をうまく組み合わせることにより、落石危険箇所をより精度よく抽出できると考える。



## 2.7 落石調査法と鳥取県における事例

本節では、鳥取県内で発生した落石の調査解析事例について述べる。ここでは、落石地域の地形解析と新しい調査手法であるボアホールカメラと熱赤外線影像法について述べている。また、ここに述べる事例は第5章に示す落石シミュレーションの題材とする。

### 2.7.1 鳥取県西部地震時に発生した大規模落石地域の調査解析<sup>5)</sup>

#### (1) 落石状況と地形解析

本節では、火山岩地域で発生した落石事例について述べる。

2000年10月6日に鳥取県西部地方の山岳部を震源とするM7.3の地震が発生した。この地震では図2.7.1に示す震源地に近い山間部において多くの落石や斜面崩壊が見られた。これらのうち、大規模な落石崩壊（径5m以上の落石）が発生した地域について落石状況と地形的特徴について述べる。



図 2.7.1 地震による落石崩壊範

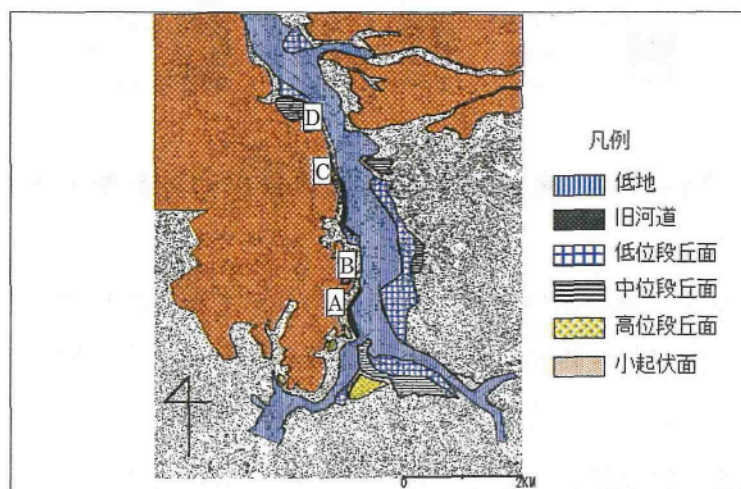


図 2.7.2 大規模落石発生地域の位置と地形区分図



地震による落石・斜面崩壊は参考文献<sup>6)</sup>で発表したが、そのほとんどが震央の半径10kmの円内に発生している。これらの内、大規模落石の発生した地域は震源地の北東約10kmに位置する急傾斜地である(図2.7.1)。落石地点は、地形地質的な観点で分類すると、以下に述べるような特徴的に類似する要因がみられる。

落石地点の周辺を2万5千分の1地形図を用いて地形区分を行ったものを図2.7.2に示す。地形区分の分類要素としては低地、旧河道、低位段丘面、中位段丘面、高位段丘面、小起伏面とし、約7km四方を地形図上で分類した。この結果得られた地形区分図によると、崩壊地は広い小起伏面(平坦面)を持つ山地の周縁部に位置していることがわかる(写真2.7.1参照)。次に、図2.7.3、図2.7.4に落石崩壊地4箇所のうち2箇所の地形地質断面図を示す。

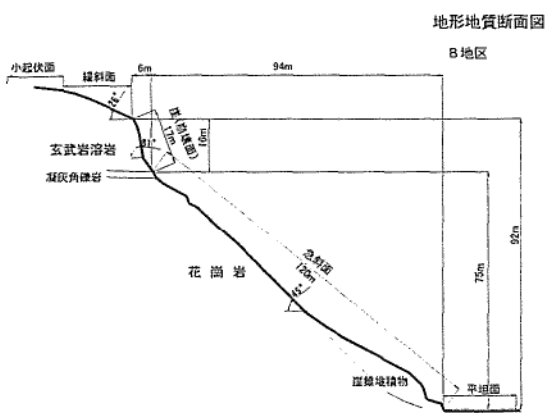


図 2.7.3 地形地質断面図 (B)

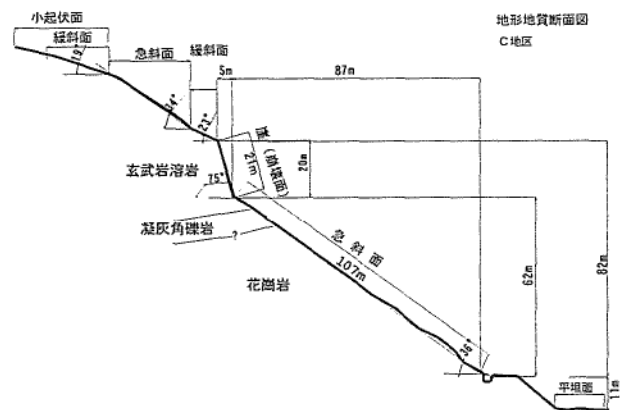


図 2.7.4 地形地質断面図 (C)

図2.7.3、図2.7.4によると、崩壊地は小起伏面直下の急崖部を崩壊面(落石供給源)とし、その下に落石の落下する急傾斜面が位置し、最下部は平坦面となる。地質的に見ると、花崗岩の上にキャップロック的構造で亀裂の発達した玄武岩溶岩が覆っている。この玄武岩が落石供給源の急崖部を形成している。崩壊形態としては図2.3.2に示したはく離型落石形態に分類される。

図 2.7.5 に、大規模落石地点 4 つの地形断面線を示す。図 2.7.5 は各地形の遷緩点(斜面勾配が急勾配から緩勾配へと急に変化する地点)を合わせて投影したものである。これによると、4 地点の地形線がほぼ同様の地形であることがよくわかる。

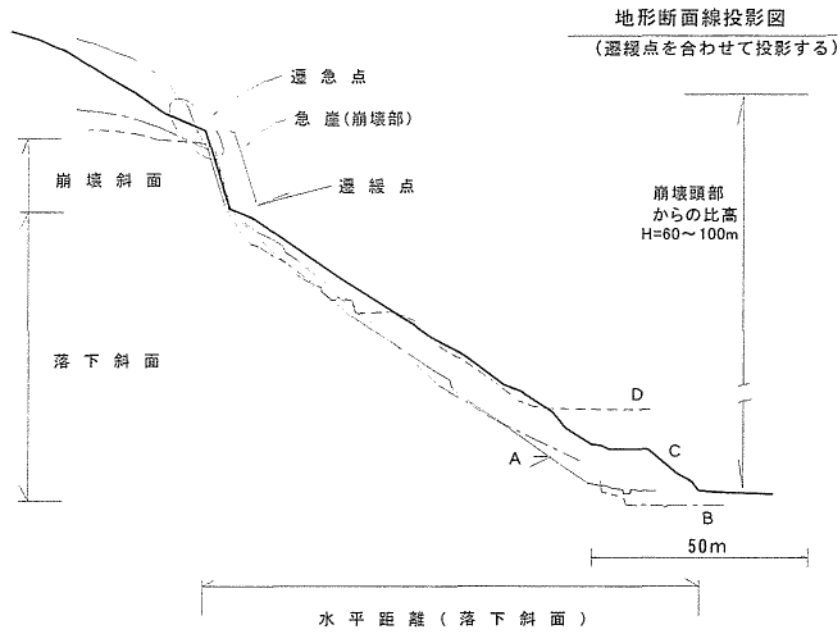


図 2.7.5 地形断面線投影図

次に、これらの斜面勾配や高さなどの地形的（幾何学的）特徴を数値でまとめると、表 2.7.1 のようになる。表 2.7.1 で表す崩壊斜面とは、図 2.7.5 では遷急点から遷緩点までの急崖を示し、落下斜面とは急崖から続く平坦面までの斜面を表す。また高さは各斜面の鉛直方向に投影した高さである。このように整理すると、各斜面が類似した特徴を示すことがよくわかる。

表 2.7.1 斜面特徴

地点	崩壊斜面		落下斜面		全体斜面	
	高さ(m)	勾配	高さ(m)	勾配	高さ(m)	平均勾配
A	27	73°	73	37°	100	44°
B	16	81°	75	45°	91	42°
C	20	75°	62	36°	82	42°
D	16	75°	26	39°	42	49°

次に落石の大きさと形状について述べる。

各地点で調査された落石個数は A 地点 35 個, B 地点 81 個, C 地点 423 個, D 地点 321 個, 計 860 個である。これらの資料をもとに落石状況をまとめると以下のようなものである。

図 2.7.6 は 4 地点の落石体積, 図 2.7.7 は落石の最大径と最小径の比 (B/H) をまとめたものである。

なお, 体積は, 最大長 (H), 最小長 (B), および最小長に直交する辺長を計測し, 直方体として算出した。

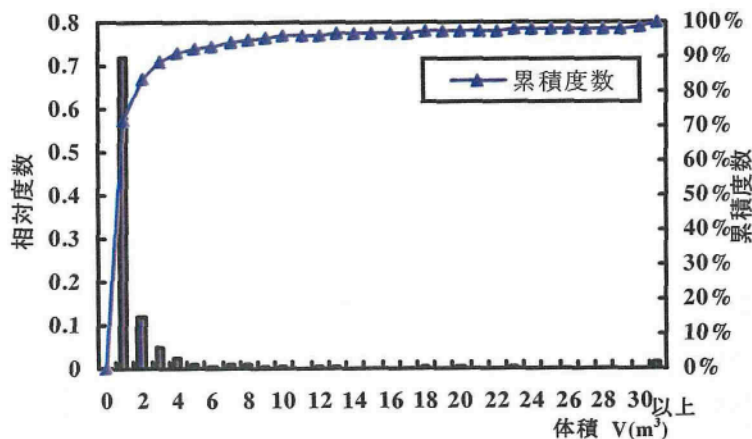


図 2.7.6 落石体積の分布

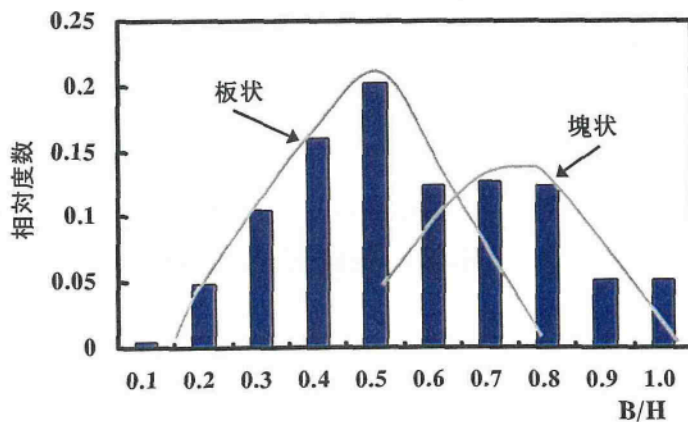


図 2.7.7 落石の最大径と最小径の比の分布

図 2.7.6 を見れば, 1m<sup>3</sup> 程度の体積を有する落石が非常に多くなっており, その割合は 70%にも達しているが, なかには非常に大きな体積を有するものもあり, 最大 84m<sup>3</sup> (3×4×7m) を有するものも確認されている。現地踏査では, 落石形状には塊状と板状の 2 種類があると観察できた。図 2.7.7 に記入したように考えると, B/H=0.5 程度の板状, B/H=0.8

程度の塊状が多かったのではないかと見える。

図 2.7.8 は到達距離に関して結果をまとめたものである。この図では各地点の地形的特徴（斜面長、高さ）が異なるので、各地点における全斜面長の水平距離（遷急点から平坦面までの水平距離）との比を用いて比較している。落石の水平到達距離に関しては、落石発生源である急崖部の頂点（遷急点）からの水平距離とした。この図の縦軸は、遷急点から平坦面までの水平距離で個々の落石の到達距離を相対化したもので表わしている。すなわち、相対到達距離が 1.0 は斜面末端部である。図によると、落石のほとんどは急崖部直下から平坦面に達するまでの斜面上で停止しているが、相対到達距離が 1.0 以上、つまり平坦面まで達しているものも確認できる。体積の大きなものが平坦面へ達している傾向がある。急崖部直下に位置するものは、落石の発生位置が急崖部の低い位置であったとも考えられる。

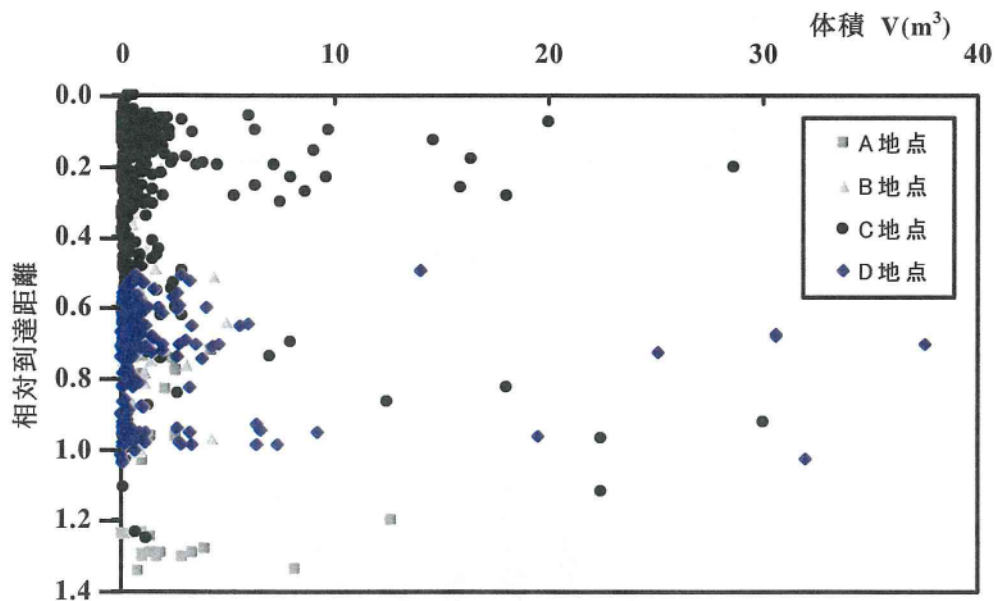


図 2.7.8 体積と相対到達距離の関係



**写真 2.7.1 崩壊地の遠景（A，B地区を約 500m南東から見る）**  
丘陵台地が広がり，その周縁が急傾斜地となっている。





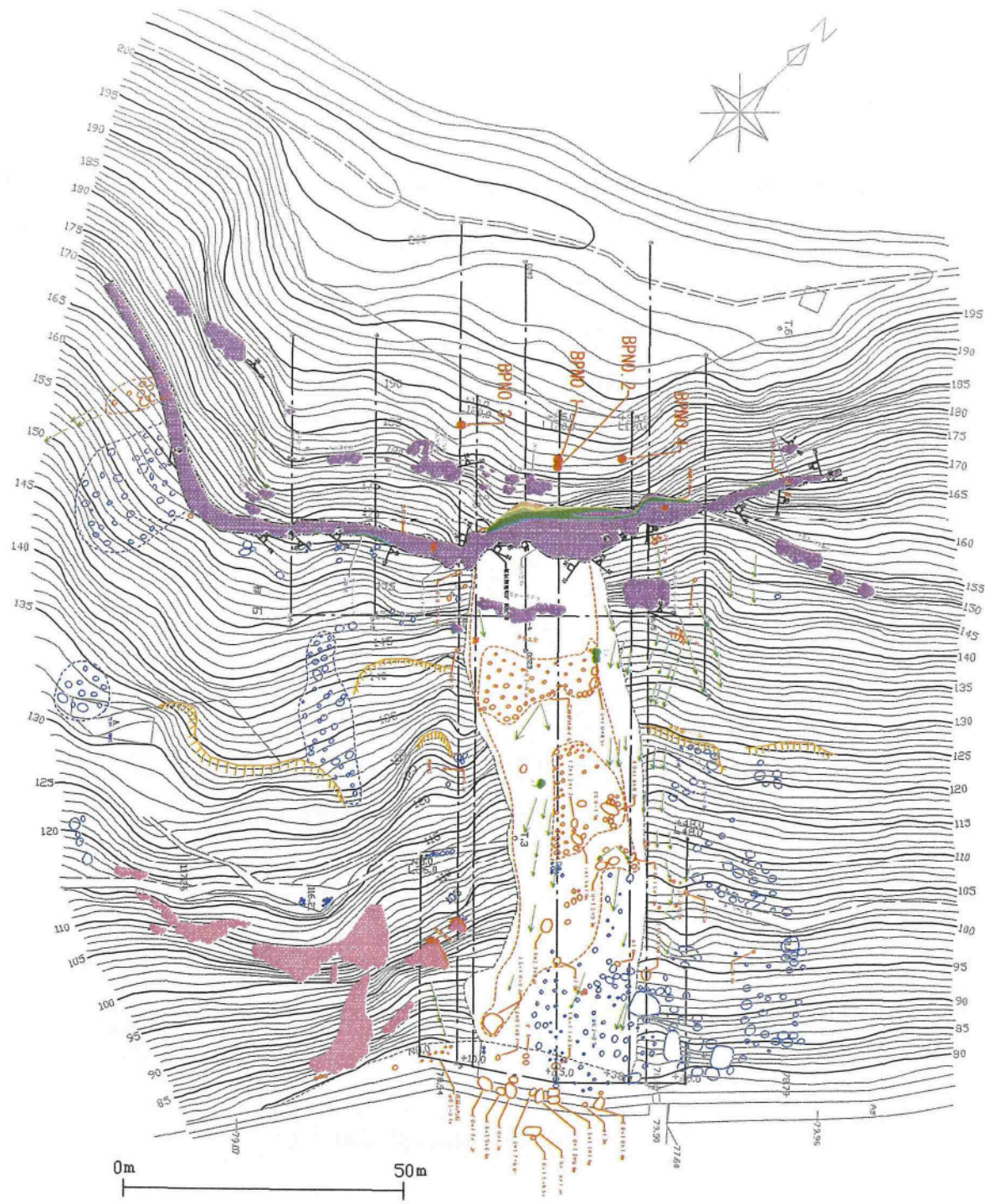
写真 2.7.2 崩壊地全景 (A地区)



写真 2.7.3  
崩壊斜面







凡 例

	ボーリング位置		古い崩壊地形
	崖堆積物		新しい転石
	玄武岩溶岩		古い転石
	凝灰角礫岩		倒木
	凝灰岩		立木
	花崗岩		割目・節理の走向傾斜
	霧頭		板状節理の走向傾斜
	新しい崩壊		写真撮影位置及び番号

図 2.7.10 調査地平面図



斜面より崩壊した物質は大部分が玄武岩溶岩の岩塊であり、岩石崩壊によってもたらされたものである。崩壊の規模は、幅約 20m、高さ 27m であり、崩壊面の長さは 28m である。崩壊の厚さ（断面幅）は直接測定できないため、崩壊中央部と側部の地形を比較することにより推定する。崩壊中央部の断面 A-4 と、側部の断面 +10 および +25、さらに崩壊していない断面 A-3 について断面を比較し図 2.7.11 に示した。

崖の傾斜は、崩壊側部で 70° 前後となり、崩壊中央部の崩壊面と崩壊していない崖の傾斜が 77~79 度でほぼ一致している。崩壊していない断面 A-3 での崖の位置と崩壊中央及び側部の崖の位置を比較すると、崖下では約 3.3m、崖中央付近で 4.2m の差が認められる。これらの状況と落下した転石の大きさが最大 4m であることから、崩壊の厚さは 4m 程度と予想される。崩壊物質の量は、長さ 28m、厚さ 4m、幅 20m から 2240m<sup>3</sup> と予想されるが、崩壊側部では崩壊量が少なくなるため、実際には 2240m<sup>3</sup> より少ないと思われる。

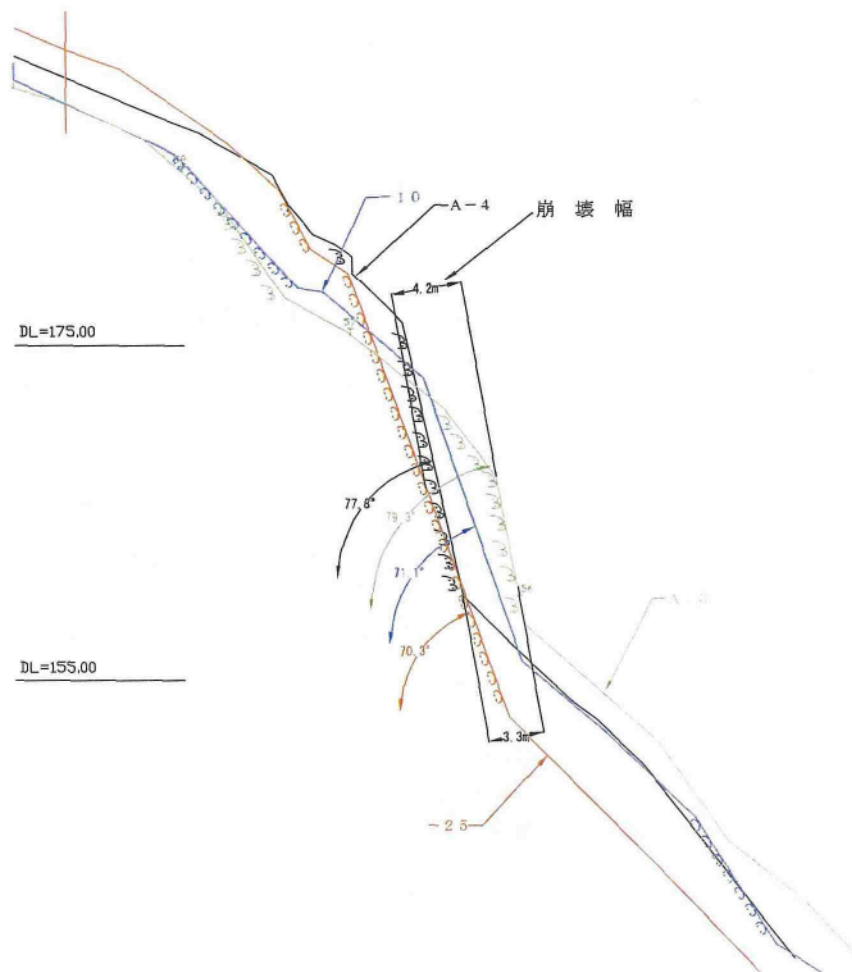


図 2.7.11 崩壊部の断面



写真 2.7.4 崩壊面の状況

写真 2.7.4 に崩壊面の状況を示す，崩壊面には玄武岩が露出し，高角度の割れ目と低角度の割れ目によりブロック化し，浮石状となっている。

次に岩盤の不連続面解析について述べる．玄武岩の崩壊面には高角度から低角度までさまざまな節理及び割目が認められ，その状況を現地にて地表踏査とボアホールカメラにより調査した．露頭での節理の状況をシュミットネットにより統計解析を行った結果を図 2.7.12 に示す．

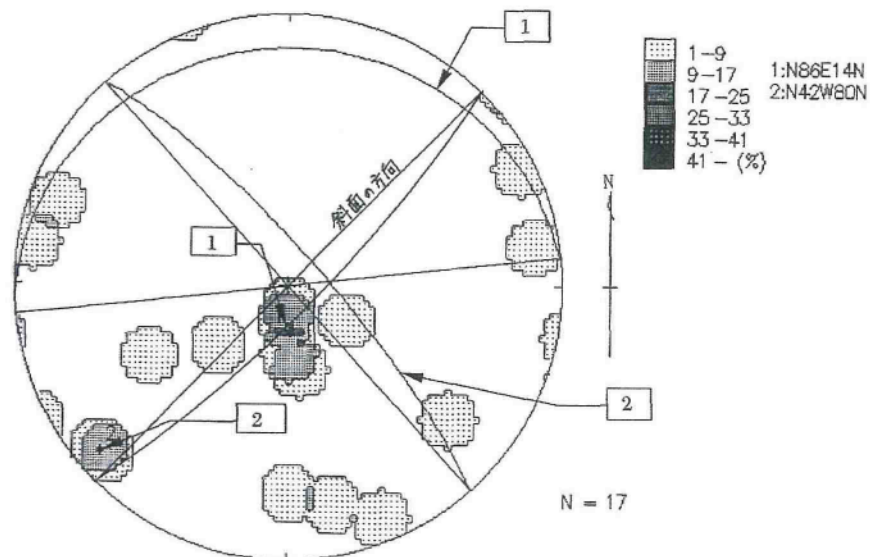


図 2.7.12 露頭の節理解析結果

観察の結果，比較的規則性のある低角度の割れ目（板状節理）と高角度の割れ目（柱状節理）が見られたことから，これを次のように分類整理した．

板状節理 0～49°

柱状節理 50～90°

板状節理の卓越方向は N86E14N であり，斜面に対して受け盤構造となる．柱状節理はばらついた状態であり，N42W82N 方向に弱い卓越が認められる．この方向は斜面に直行する方向である．

ポアホールカメラ観測（BP.1～BP.4）によって求めた岩盤中の割目・節理についてシュミットネット統計解析を図 2.7.13.に示す．

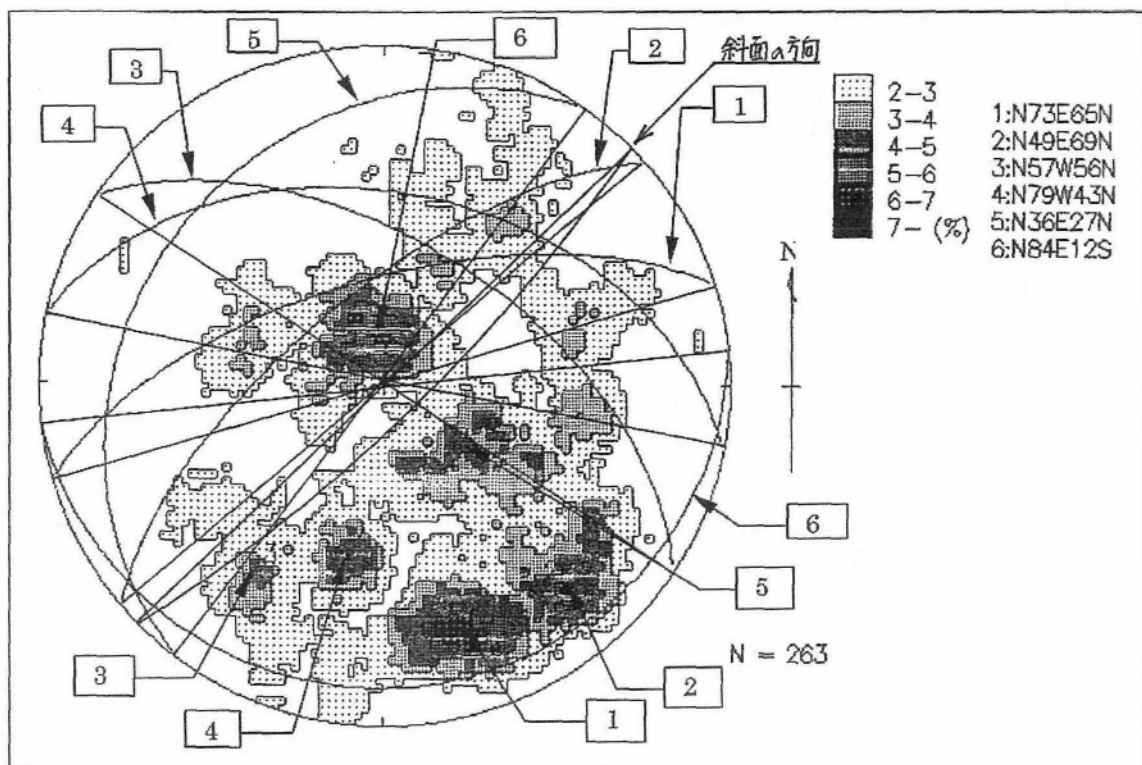


図 2.7.13 ポアホールカメラによるシュミットネット解析図

玄武岩溶岩は 3 枚分布しており，ポアホールカメラ観測を行ったのは上部 2 枚の玄武岩溶岩であり，ここでは説明の都合上上部玄武岩溶岩と中部玄武岩溶岩とする．また，割目及び節理はすべて節理とし，路頭での節理と同様に柱状節理（50～90°）と板状節理（0～49°）とした．シュミットネットによる統計解析は上・中の玄武岩，板状・柱状節理，

各ボーリング毎など、計 17 項目に分類して行い、各項目での卓越方向を表 2.7.2 にまとめた。

岩盤斜面の方向は N45° E であり、斜面との関係は次のように分類した。

斜面に平行 N25° ~65° E

斜面に直交 N25° ~65° W

斜面に斜交 上記以外

流盤及び受盤 斜面に平行または斜交

横盤 斜面に直交 (N25° ~65° W)

表 2.7.2 節理の卓越方向一覧表

記号	柱状節理の卓越方向				板状節理の卓越方向			
	C-1	C-2	C-3	C-4	S-1	S-2	S-3	S-4
全データ	N73W65N	N49E69N	N57W56N		N79W43N	N84E12S		
上部玄武岩				N71E66N		N83E11S		
中部玄武岩		N48E72N			N79W41N		N62E22N	N5E33S
上部玄武岩柱状			N56W58N	N72E65N				
上部玄武岩板状						N83E11S		
中部玄武岩柱状		N46E71N						
中部玄武岩板状							N63E23N	
各ボーリング	BP.1				N80W41N	N80E12S		
	BP.2		N58W59N		N76W47N			
	BP.3	N50E70N		N71E67N				
	BP.4						N67E26N	N5E30S
上部玄武岩	BP.1					N80E12S		
	BP.2		N58W60N		N77W47N			
	BP.3			N72E65N				
中部玄武岩	BP.1				N80W41N			
	BP.2							
	BP.3		N45E72N					
斜面との関係	受盤	受盤	横盤	受盤	受盤	流盤	受盤	流盤
	斜交	平行	直交	斜交	斜交	斜交	平行	斜交
交差方向	EW			EW	EW	EW		NS

斜面の方向N45° E  
 断面の方向N45° W  
 平行N25° ~65° E  
 直交N25° ~65° W  
 斜交 上記以外

ボアホールカメラによるシュミットネット解析結果をまとめると次のようである。

柱状節理はばらついた状態であり、斜面に対して平行・直交及び斜交し、受盤および横盤の節理が卓越している。

節理 C-1 は、全体としては卓越方向となっているが、上部玄武岩・中部玄武岩及び各ボーリング地点では卓越しない結果となっている。

節理 C-2 は、全体及び中部玄武岩に卓越し、特に BPNO.3 地点で卓越している。

節理 C-3 は、全体及び上部玄武岩に卓越し、特に BPNO.2 地点で卓越している。

節理 C-4 は、上部玄武岩で卓越し、特に BPNO.3 地点で卓越している。

板状節理はばらついた状態であり、斜面に対しては平行・直交及び斜交し、受盤・流盤及び横盤となっている。

節理 S-1 は、全体及び中部玄武岩溶岩に卓越し、特に上部玄武岩溶岩の BPNO.2 地点および中部玄武岩溶岩の BPNO.1 地点に卓越している。

節理 S-2 は、全体及び上部玄武岩溶岩に卓越し、特に BPNO.1 地点に卓越している。

節理 S-3 及び S-4 は、中部玄武岩溶岩に卓越し、特に BPNO.4 地点に卓越している。

以上に述べたように玄武岩節理の卓越方向はばらついた状態であり、場所により変化している状況である。このため、玄武岩溶岩に発達する節理は連続性に欠けていると考えられる。したがって、崩壊地の玄武岩節理は他の節理により切断されていると考えられ、ランダムな方向の柱状節理や板状節理によりブロック化されている状態と推察される。

統計解析では節理の深度分布状況や開口状態を把握することができないため、斜面に直交する断面において節理の分布状況を把握するため解析断面図を作成し図 2.7.14 に示した。断面解析において節理を板状節理と柱状節理に分類し、それぞれの節理において開口節理と密着した節理に区分した。また、柱状節理については、見掛けの傾斜が真の傾斜よりかなり低角度となる横盤方向の節理を区分した。

断面方向へ節理を投影するために次式により見掛けの傾斜角を求めた。

$$\tan \alpha = \sin \theta \times \tan \beta$$

$\alpha$  : 見掛けの傾斜角

$\beta$  : 真の傾斜角

$\theta$  : 断面方向と節理の走向との交差角

図 2.7.15 によると、全体的に上部玄武岩溶岩で節理が多く中部玄武岩溶岩で節理が少ない状態となっている。開口節理はすべての地点で認められるが、崩壊中央背後の BPNO.2 地点が最も多い状態である。崩壊面より離れた BPNO.1 地点の深部においても開口節理が認められる。玄武岩溶岩形成時には、冷却により柱状節理や板状節理が形成される。これらの節理は収縮によるもので玄武岩溶岩形成時から開口している節理も存在する。したがって、深部の開口節理は玄武岩溶岩形成時から開口していたと思われる。

開口節理は、玄武岩溶岩形成時とその後の緩みによるものがあり、両者を区分することは難しい。ゆるみによる開口節理が存在する所では、ゆるみのない所と比較すると開口節理の量が多くなると予想され、開口節理が最も多い BPNO.2 地点ではゆるみによる開口節理が存在していると予想される。



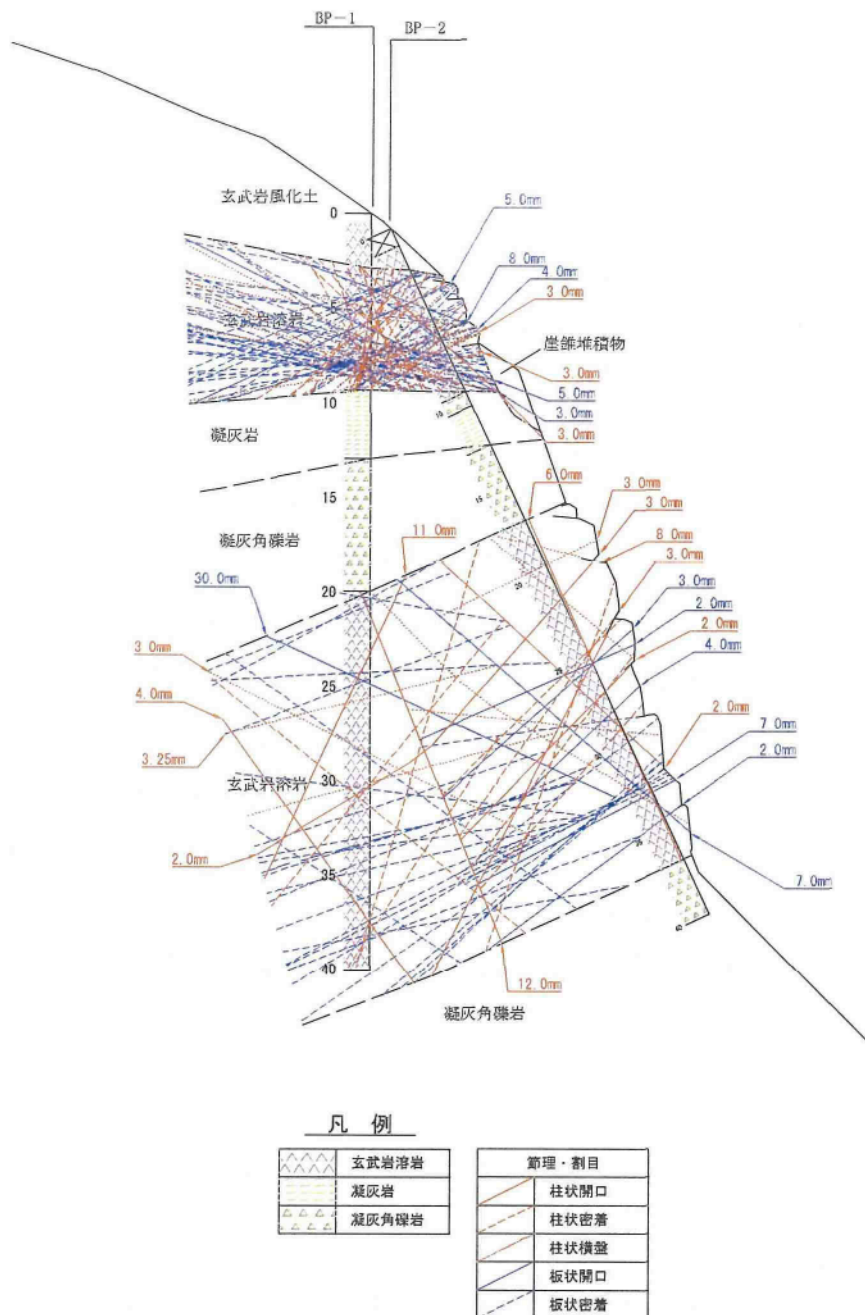


図 2.7.14 節理（割れ目）解析断面図

以上に述べた不連続面の解析結果を総合的に判断すると、節理の卓越方向はばらついた状態であり、場所により変化している状況である。このため、玄武岩溶岩に発達する節理は連続性に欠けていると考えられる。したがって、崩壊地の玄武岩節理は他の節理により切断されていると考えられ、ランダムな方向の柱状節理や板状節理によりブロック化されている状態と推察される。このようなブロック化された岩体が地震の振動により不安定化し、崩壊に至ったと考えられる。このため、今後も、同様な崩壊が発生する恐れがあると予想される。

## 2.7.2 花崗岩分布地域で発生した落石斜面の調査解析<sup>7)</sup>

ここでは、鳥取市の市街地で発生した落石崩壊についての現地調査事例と新しい調査手法である熱赤外線映像手法を適用した例を示す。熱赤外線映像法は人が踏み込めないような地点での調査が可能であるため、これにより浮石などの落石危険箇所が特定できれば、次段階での検討として落石シミュレーションが有効利用できると考えている。

### (1) 概要

対象斜面は交通量の非常に多い国道に面した採石場の跡地であり、斜面上部には重要な公共施設が建設されている。この岩盤斜面は、古くから小規模な落石が生じており、今回は震度3の地震と台風が原因とみられる小規模な落石崩落が発生した。調査地の地質は中生代白亜紀～新生代古第三紀の鳥取花崗岩である。

落石崩落の経緯は、図 2.7.15 に示すように震度3の地震の発生から3日後の台風8号による豪雨時に発生している。この豪雨は、調査地の降雨記録はないが隣町の鹿野町では日雨量 311mm、最大時間雨量 63mm を記録している<sup>8)</sup>。この最大時間雨量時に落石崩落が発生している。また、この時の暴風雨は、岩盤斜面を叩き付ける方向に作用していた。落石崩落の状況を図 2.7.16、図 2.7.17 に示す。崩落した岩塊(約 5m<sup>3</sup>)は、10m程度の高さから落下し、斜面末端から約 15m まで飛び跳ね、砕け散っていた。

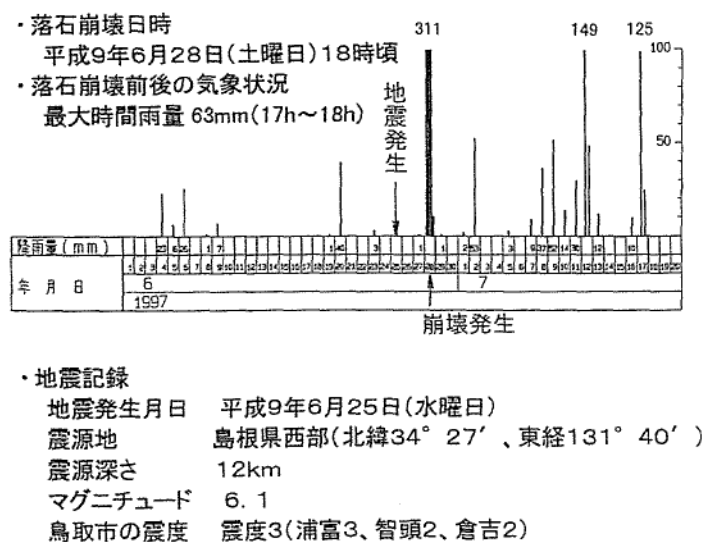


図 2.7.15 落石崩壊の経緯

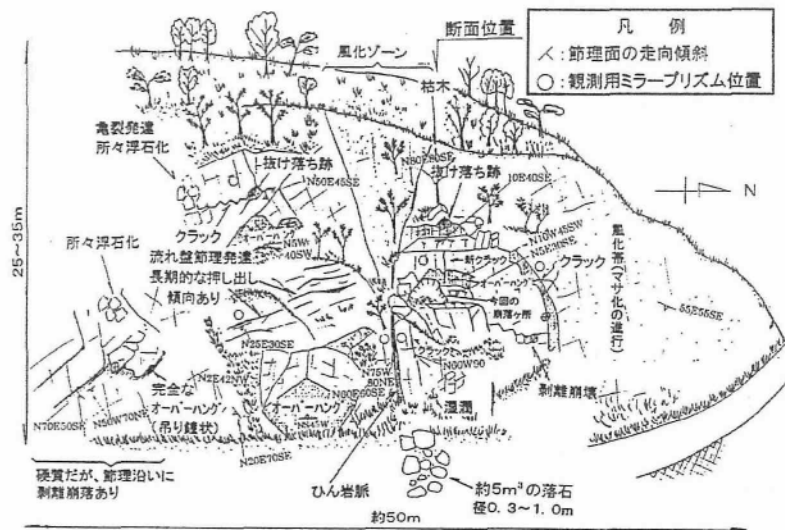


図 2.7.16 岩盤斜面スケッチ図

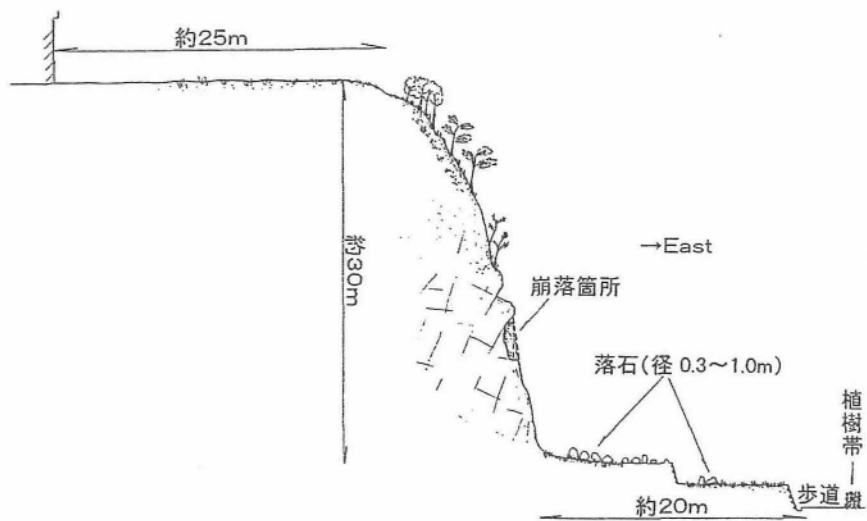


図 2.7.17 落石崩壊模式断面図



## (2) 岩盤斜面の不連続面解析

ボアホールカメラ観察による割れ目分布を図 2.7.18 に示す。これによると、岩盤斜面側の BP 3 は開口幅 1 mm 以上の割れ目（最大割れ目幅は 64mm）が全区間に存在している。一方、BP 4 の割れ目は 4 本だけである。

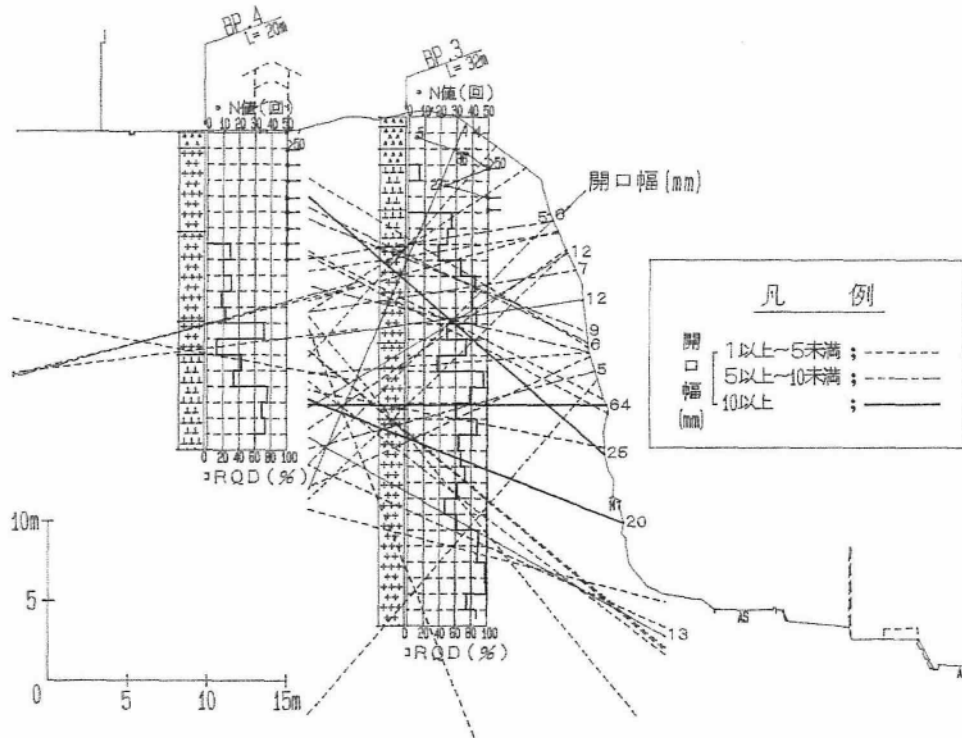


図 2.7.18 開口割れ目分布図

図 2.7.19 は、急崖部の顕著な割れ目や岩盤面を直接計測し、シュミットネットに投影した地表部の走向傾斜である。図 2.7.20 には、ボアホールカメラ解析によるボーリング孔内の不連続面の走向傾斜を示す。

図 2.7.19 によると、地表部の不連続面の特徴は、急崖斜面に対して流れ盤状のゾーンとその共役方向の受け盤のゾーンが顕著であること、斜面の走向に対して直交する割れ目や岩脈が見られることである。ボーリング孔内の不連続面は、BP3 では地表部での計測結果と類似した傾向を示しているが、BP4 では流れ盤状の開口割れ目が見当たらない。割れ目の特徴は、割れ目の間に充填物がなく、急崖部に近いゾーンでの割れ目の発達が顕著、等である。これらのことから、割れ目は比較的新しい時期に開口したと思われる。割れ目は、貫入岩貫入時や地盤隆起時に形成され、その後、採石時の応力解放や地震等による岩盤変形等によって助長され開口したと考えられる。そして、その岩盤変形は主にひん岩脈（厚さ約 5 m、走向傾斜 N 9° W 49° W）下位の花崗岩体で発生したと思われる。

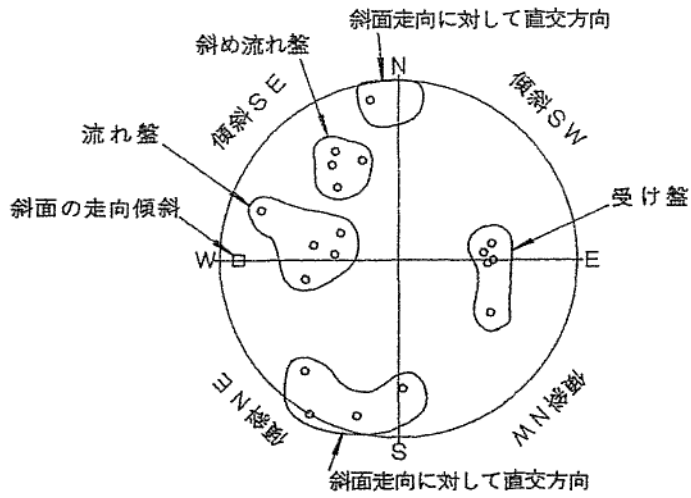


図 2.7.19 露頭部の節理面

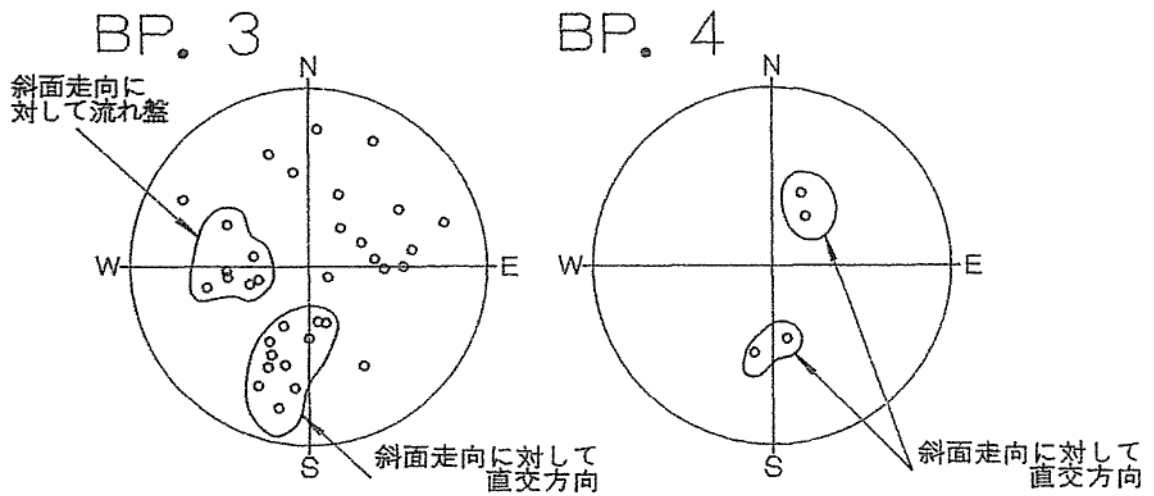


図 2.7.20 孔内の不連続面（開口亀裂）

### (3) 熱赤外線映像法の岩盤斜面調査への適用

#### i) 概要

熱赤外線映像法は、熱赤外線の放射エネルギーを測定することで、材料表面の温度を遠隔から非接触で計測し、その物体の状態を把握する技術である。この方法は、測定が簡便で、遠隔から非接触で物体の状態を把握できることから、建物外壁や吹付法面の老朽化診断調査に利用されている<sup>9)</sup>。しかしながら、岩盤斜面に対しては、その不均質性によって明確な解析手法は確立されていない。そこで、今回は、この方法を用いて岩盤の風化・緩み・浮石化・地下水状況・植生等の性状を面的に把握しようと試みたものである。このような方法で人が踏み込めないような地点でも浮石の把握が可能になれば、数値シミュレーションの利用拡大が図られると考える。

#### ii) 調査方法

測定は、対象斜面を一望できるように、斜面向い側マンション上階から実施した。測定は水平約 26m、垂直約 25m の範囲を対象とし、夏季の好天時 10:15 から 17:00 まで、約 30 分間隔で実施した。熱赤外線映像法の測定から解析までの流れを図 2.7.22 に示す。

測定機器は、太陽光の反射による影響を受けにくい長波長域 ( $\lambda=8\sim 13\mu\text{m}$ ) の赤外線放射温度計を用いた。センサー仕様としては、最小検知温度差が  $0.025^\circ\text{C}$ 、瞬時視野角は  $1.5\text{mrad}$  であり、今回の測定範囲においては約 10cm の分解能となる。

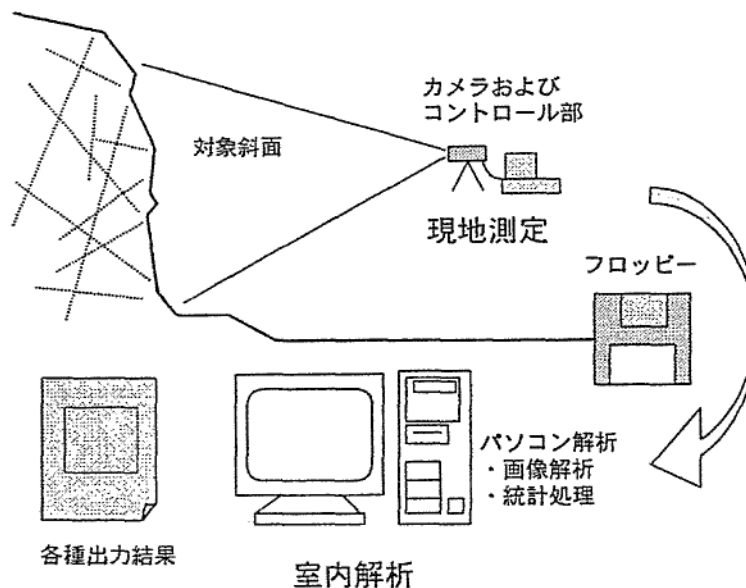


図 2.7.21 熱赤外線映像法概念図

### iii) 解析手法

熱赤外線映像法は、物体表面の温度によって映像が作成されることから、その映像のみでは解析する位置の特定が困難である。今回の測定ではセンサーの最小検知範囲（画素）を約 10cm 四方に設定しており、図 2.7.22 に示すように縦横 20 画素（約 2m）毎に区画を設け、それぞれに「A..M 列/1..12 行」というインデックスを設定して解析位置を表現した。

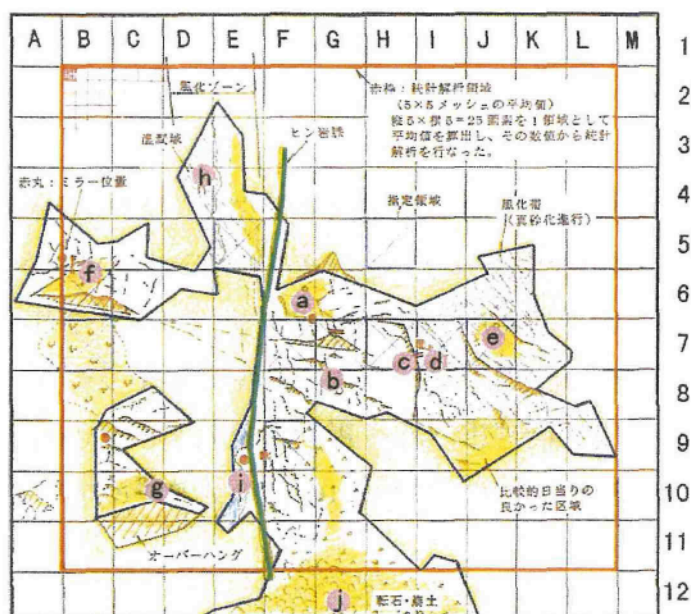
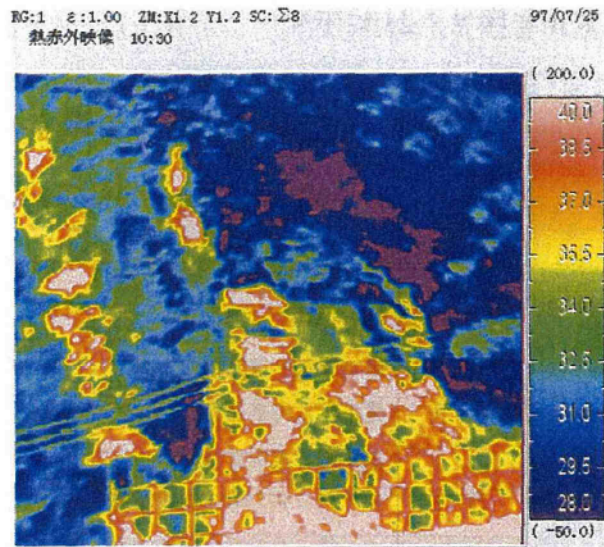


図 2.7.22 解析領域インデックス図

解析においては、現地測定によって取得された熱赤外映像の温度範囲を調整し、画像処理により解析インデックスをオーバーレイ表示することから始めた。オーバーレイ表示した熱赤外映像の例を図 2.7.23 に示す。ここで、熱赤外線映像とは寒色系の低温部から暖色系の高温部まで虹色のグラデーションで温度を表現したものである。また、時間経過による温度変化を把握するため、2 つの時間における温度差を求め、熱差画像を作成した。画像では、温度の上昇している領域を暖色系、温度の低下している領域を寒色系で表現した。



↓ 熱赤外映像に  
解析インデックスを重ねる

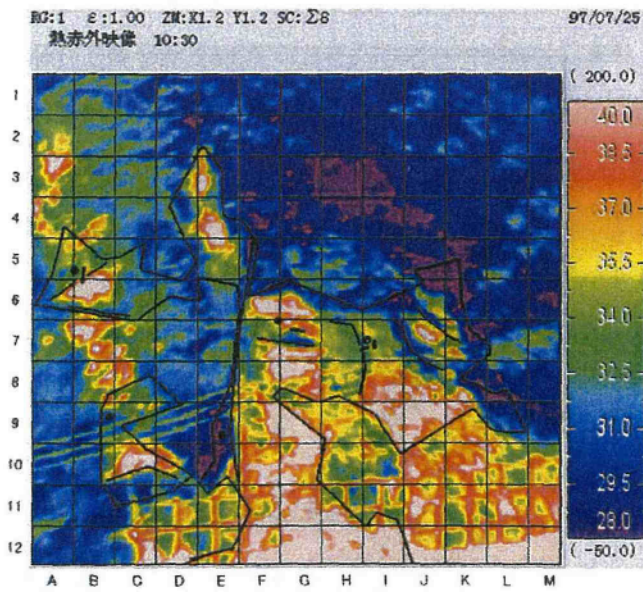


図 2.7.23 熱赤外線映像のオーバーレイ表示



#### iv) 測定結果

岩盤性状と温度の関係を検討するため、岩盤性状に関わる標点を設定し、その標点の経時的温度変化を調べることにした。表 2.7.3 に岩盤性状に関わる 10 種類の標点を示す。また、標点の経時的な温度変化を図 2.7.24 に示す。

表 2.7.3 岩盤性状に関わる標点

標点	岩盤性状ほか
● a	オーバーハング状硬質岩盤
■ b	硬質岩盤
▲ c	風化帯との境界付近
◆ d	風化帯との境界付近
○ e	風化帯（真砂化進行）
□ f	オーバーハング状硬質岩盤
△ g	オーバーハング状硬質岩盤
+ h	湿潤域（風化ゾーン）
× i	湿潤域（表流水あり）
◇ j	斜面下方の転石・崩土

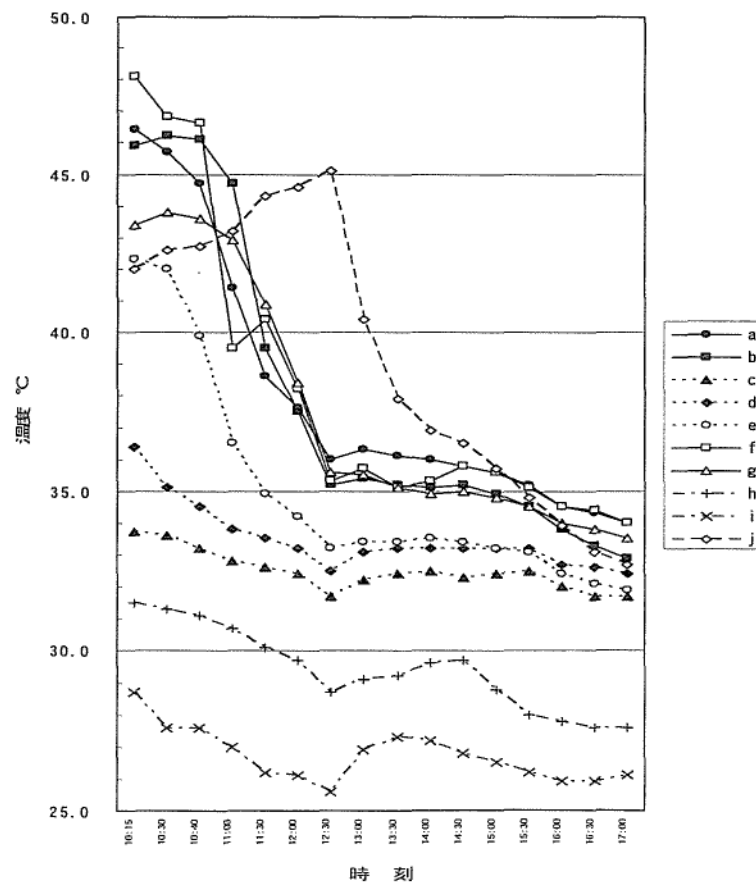


図 2.7.24 観点の経時的温度変化

図 2.7.24 において注目すべき事項を以下に列挙する。

硬質岩盤において、[a,f,g]オーバーハング状部と[b]平坦な部分では、日照条件の差による影響はあるものの、明瞭な差異は認められない。

[j]斜面下方の転石・崩土は、12:30 くらいまで直射日光にさらされており、その影響で昼すぎまで温度上昇を示し、その後急激に温度が低下している。これらの転石・崩土の温度変化は、硬質岩盤[a,b,f,g]と夕方の時間帯で交差し、急激な低下を示しており、岩盤に比較して熱を放出しやすい性質が現われている。

[e]真砂化風化帯についても、風化帯との境界付近の[c,d]に比較して、夕方の温度低下傾向が強く、風化の進行に伴って岩盤が細片化し、熱放出が容易となった影響であろう。

[c,d]風化帯との境界付近の温度が全般に低いのは、午前中の日当たりが悪い位置にあったもので、岩質による差異を認めるまでには至らなかった。

[h,i]湿潤域は特に温度が低く、温度変化も小さいことから、他の部分とは明瞭に区別できる。

## v) 解析および考察

2次解析として多変量解析を含む統計処理を行ない、岩盤斜面に対する考察を行なう。2次解析の統計処理は、「5×5 メッシュの平均値」を基本数値として実施する。

### ①全時間帯の温度平均値（図 2.7.25）

日当たりの良かった領域で高温度を示すが、真砂化風化帯では、温度低下が急速なためさほど高い値を示さない。湿潤域が常に低温を保っていた状況も明瞭に現われている。

### ②全時間帯の温度の標準偏差（図 2.7.26）

時間経過による各領域の温度変化の度合が示されており、日当たりの良かった領域が温度変化の度合が強いことがわかる。したがって、凹凸の激しい岩盤斜面へ適用する場合には様々な角度からの検討が必要となる。

### ③最大温度上昇量（図 2.7.27）

岩盤域と植生域の両者を明瞭に区分することができる。これは、岩盤域の温度上昇が直接的な日射の影響を強く受けるのに対して、植生域では昼過ぎからの気温上昇の影響が強いことを示している。

### ④最大温度低下量（図 2.7.28）

日当たりの良かった領域で高い値を示しており、温度が高くなった領域ほど大きな温度低下をしている。ただし、さほど高温でなかった風化帯域でもやや高い温度低下量を示している。この理由としては、硬質な岩盤域に比較して熱容量が小さく、素早く熱を放出した結果と考えられる。

測定温度の経時変化 (10:30~16:30 1時間毎データより)  
全時間帯の温度平均値

(5×5メッシュの平均値)

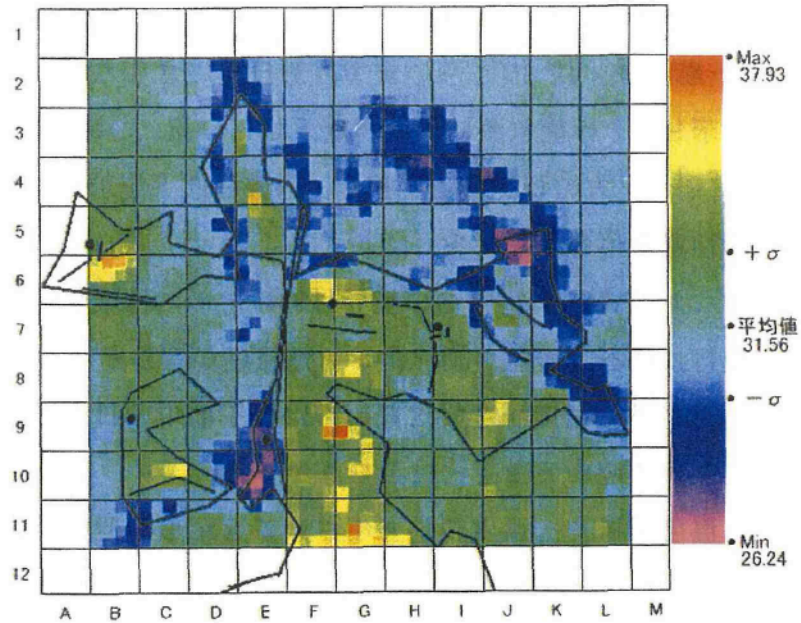


図 2.7.25 全時間帯の温度平均値画像

測定温度の経時変化 (10:30~16:30 1時間毎データより)  
全時間帯の温度の標準偏差

(5×5メッシュの平均値)

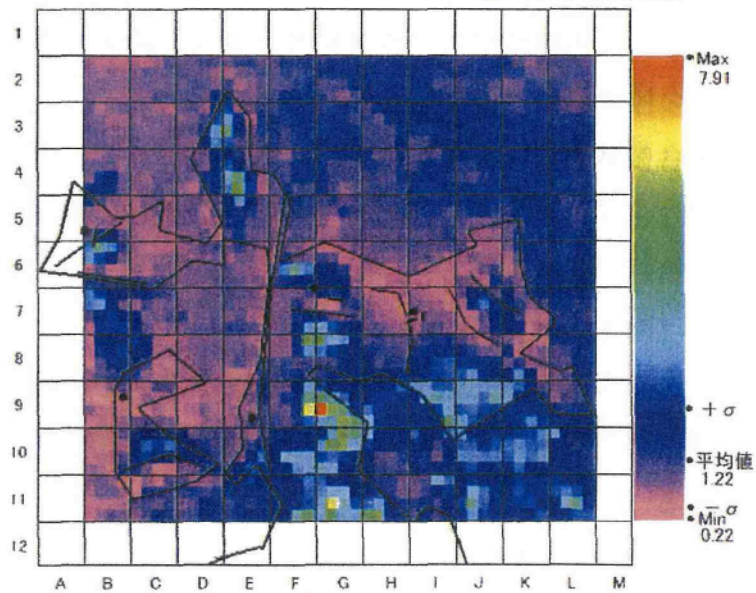


図 2.7.26 全時間帯の温度の標準偏差画像

測定温度の経時変化（10:30～16:30 1時間毎データより）  
 最大温度上昇量（1時間あたり）

（5×5メッシュの平均値）

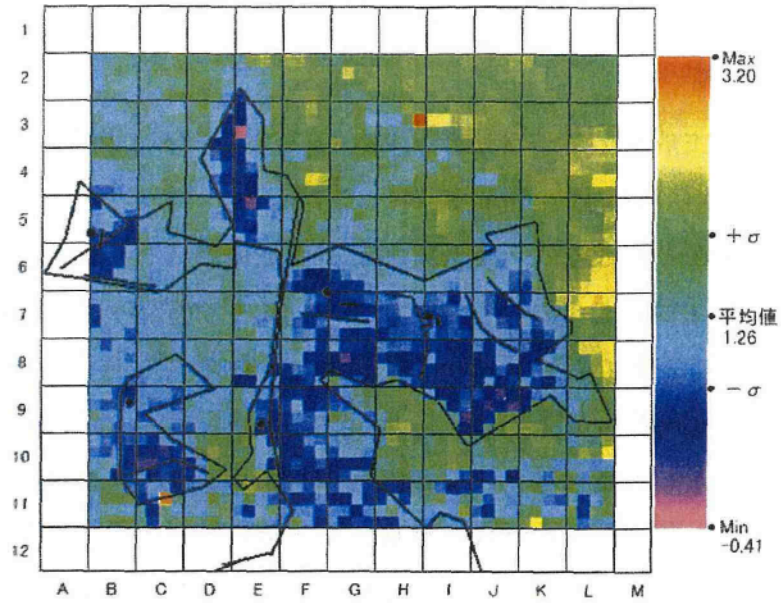


図 2.7.27 最大温度上昇量画像

測定温度の経時変化（10:30～16:30 1時間毎データより）  
 最大温度低下量（1時間あたり）

（5×5メッシュの平均値）

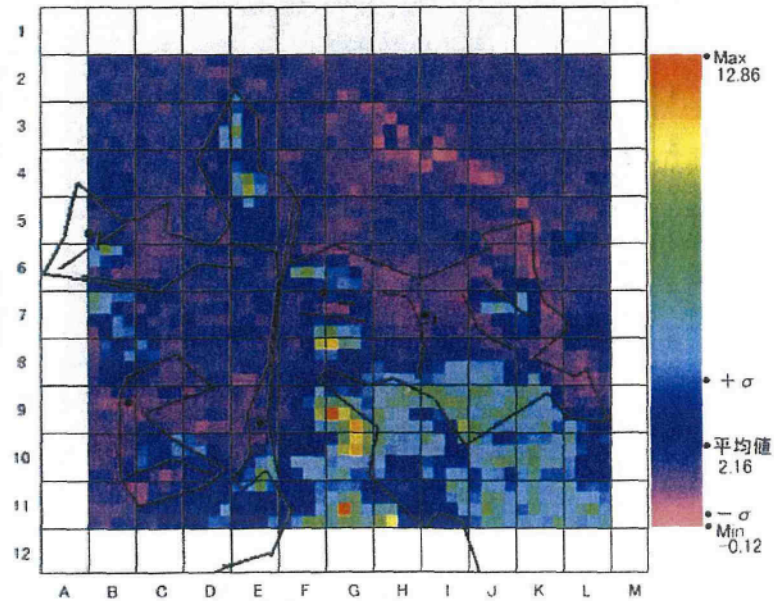


図 2.7.28 最大温度低下量画像



次に、5×5 メッシュ平均値の時間別温度データによる主成分分析を実施する。これは、複雑な経時的温度変化のパターンを主成分分析によって単純化し、岩盤斜面の性状を客観的に認識する可能性を検討するものである。第1,第2主成分スコアをそれぞれ図 2.7.29 および図 2.7.30 に示す。

図 2.7.29 の第1主成分のスコア画像では、高スコアの領域は常に周囲に比べて高い温度の領域であり、硬質岩盤域および転石・崩土の領域を示している。スコアの低い領域は周囲に比べて低い温度の領域であり、湿潤域および風化の進行した領域を示している。

図 2.7.30 の第2主成分のスコア画像では、高スコアの領域は時間経過とともに低温域から高温域へ変化する領域であり、植生が繁茂している領域にほぼ一致している。また、針葉樹の低木域と広葉樹が主体の区域ではスコアが異なっており、多変量解析によって領域区分を行なえる可能性を示している。第2主成分は時間経過とともに高温域へ変化する性質を示すことから、そのスコアが低い領域には、常に低温である領域に加えて、温度低下の著しい領域も含まれている。つまり、初期には日照が良く高温域となったが、熱放出が早いために低温領域に変化した転石・崩土域や風化の進行した領域がこれに相当する。

5 × 5メッシュの平均値による  
主成分分析結果 【第1主成分】

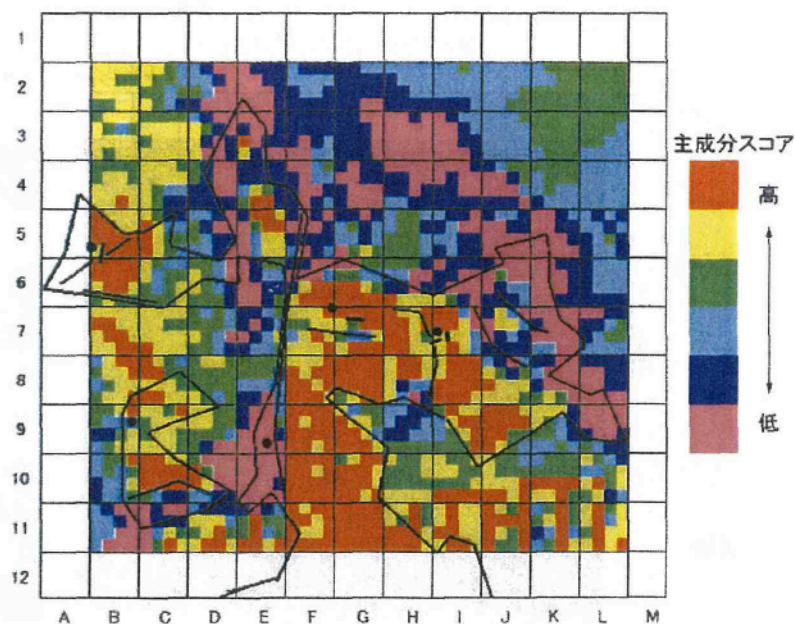


図 2.7.29 第1主成分スコア画像



5 × 5メッシュの平均値による  
主成分分析結果 【第2主成分】

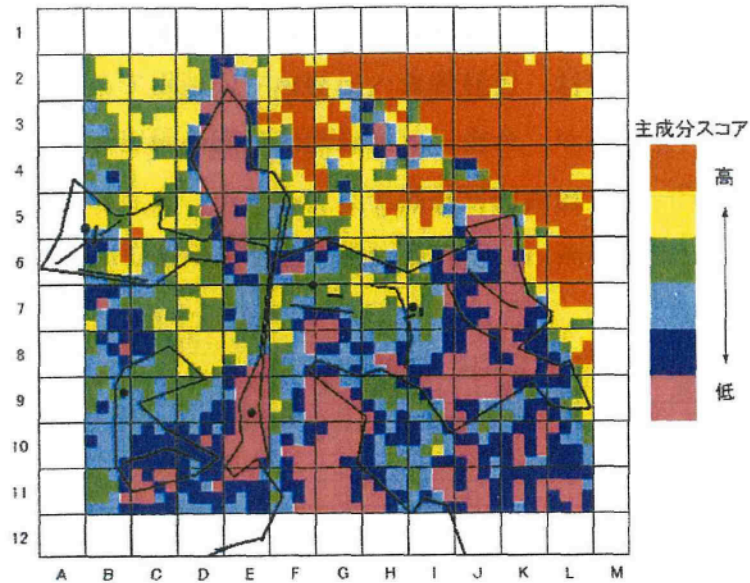


図 2.7.30 第2主成分スコア画像

熱赤外線映像法は対象物の表面温度を測定するものであるが、表面温度は熱伝導率や熱容量に左右されるものである。したがって、岩盤や土砂の性状によって温度変化の特性が異なり、熱赤外線映像でその性状を推測することが可能である。しかし、表面温度は日照などの周囲からの熱供給の影響が大きく、斜面形状や日射状況も検討データに含めておく必要がある。

硬質岩盤部と風化帯に関しては、この手法で区分することが可能であり、植生域と露岩域については明瞭な区分が可能であった。また領域区分における主成分分析の適用性についても、確認することができた。ただし、開口亀裂周辺の岩盤の不安定化に関しては、ブロックが50cm～1m以上と大きいため、今回の測定では判別できなかった。これは、数時間程度の測定期間中の岩盤斜面の温度変化は、表面からせいぜい10数cmの範囲の岩盤性状に起因するものであり、より大きなスケールの不連続面が存在しても、表面温度の日変化には差が生じないことが原因として考えられる。

#### (4) まとめ

岩盤崩壊は前兆現象が少なく、突発的に発生するため、その予測は難しく、調査手法も確立していない。

当事例ではボアホールカメラ等による岩盤不連続面解析とリモートセンシング的手法で

ある熱赤外線映像法の適用を検討した。

ポアホールカメラ等による不連続面の検出と岩盤ブロックのモデル化は非常に有効な調査手法といえ、数値解析と併せて利用していくことが望ましいと考える。

熱赤外線映像法については、岩盤調査への初めての適用であり、計測データが必ずしも十分であったとはいえないが、今後、計測時間や時期の設定方法を工夫し、斜面方向や日照条件、気温等のデータを総合的に検討するとともに、さらに各種手法に改善を加えることにより、総合的で精度の高い、新たな岩盤調査手法の確立が期待される。

### 2.7.3 千枚岩分布地域で発生した落石斜面の調査解析

ここでは、鳥取県佐治村A地区で発生した千枚岩分布地域の落石斜面の事例を示す。この事例は、5.2に示す落石シミュレーションの題材とする。

#### (1) 概要

崩壊日：平成15年4月20日 夜中

場 所：鳥取県八頭郡佐治村

崩壊日およびその前後の雨量：

平成15年4月 「日降雨量」(アメダス佐治データ)					
日	降雨量(mm)	日	降雨量(mm)	日	降雨量(mm)
1	0	11	1	21	5
2	6	12	5	22	0
3	0	13	0	23	33
4	32	14	0	24	7
5	27	15	0	25	19
6	0	16	0	26	0
7	0	17	0	27	0
8	14	18	0	28	0
9	6	19	1	29	0
10	0	20	19	30	11

平成15年4月20日 「時間降雨量」					
時	降雨量(mm)	時	降雨量(mm)	時	降雨量(mm)
1	0	9	0	17	0
2	1	10	4	18	1
3	2	11	2	19	0
4	1	12	2	20	0
5	2	13	0	21	0
6	1	14	1	22	0
7	1	15	0	23	0
8	1	16	0	24	0

地元からの聞き取りによると、斜面崩壊は平成15年4月20日の夜中に発生し、その深夜には相当量の降雨があったとのことである。アメダスのデータによると、20日の日降雨量は19mmであるが、当該地周辺ではこれ以上の降雨があったと推察される。

#### (2) 落石のメカニズム

斜面崩壊は小規模な農道の斜面で発生しており、その形態は、大径の落石を伴う崖崩れ（岩盤の剥離崩壊）である。

落石崩壊のメカニズムは、図2.7.32に示すように亀裂の発達した岩盤が降雨を要因として、はく離型の落石崩壊を起こしたものと考えられる。

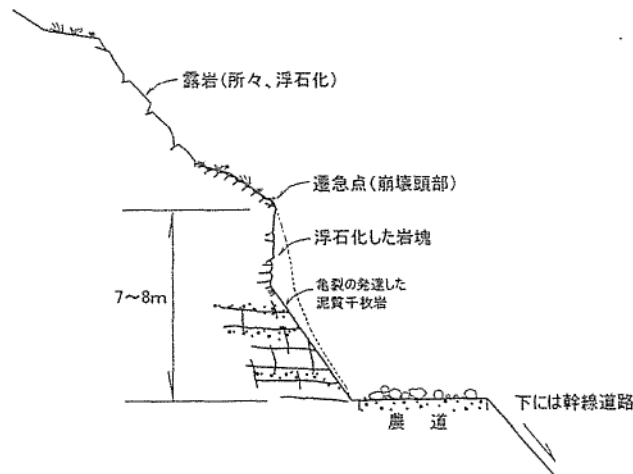


図 2.7.31 崩壊模式図

崩壊の規模は高さ7~8m, 幅6~8m, 深さ1~2m程度である. この崩壊により, 1m大の落石が農道上に多数落下している. 崩壊の頭部は地形の遷急点に当たり, その上部斜面は緩勾配のやせ尾根地形となっており, 浸食作用が活発な箇所(浸食前線)と考えられる. 崩壊斜面の上方斜面には亀裂の発達した露岩があり, しかも所々浮石化している. 農道の下方斜面末端には交通量の多い幹線道路が位置しており, 斜面上方から落石が発生した場合は農道を飛び越えて, あるいは農道で跳ね返って下方の斜面を転がり, 幹線道路まで達する危険性がある. しかしながら, 崩壊地は尾根地形であるため落石が発生した場合の落石軌跡・到達位置を推定することは困難である. このような場合には, 3次元シミュレーションによる予測の適用が望ましいと考える.

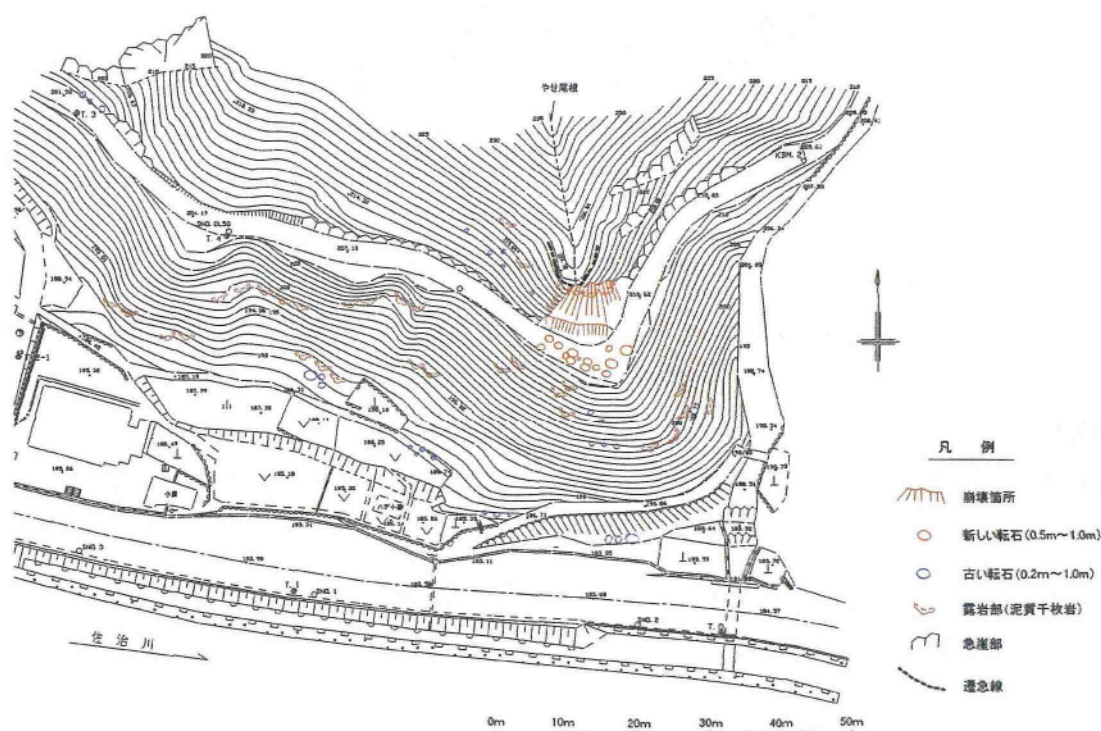


図 2.7.32 落石地平面図

調査地は中国地方に広く点在する三郡変成岩類の分布地域である. 三郡変成岩類は古生代末期から中生代初期(約2億5千万年)に変成作用を受けた変成岩であり, 調査地周辺には泥質千枚岩と珪質千枚岩が出現している. この内, 対象地域は泥質千枚岩を主体としている.

泥質千枚岩は黒色ないし暗灰色を呈する泥質岩起源の岩石であり, 珪質千枚岩はチャート等を源岩とする. このため, 前者の方が剥離性に富む傾向がある. 変成岩は面構造に支配された片理面から剥離しやすく, 一般的には片岩, 千枚岩, 粘板岩の順に剥離性が強いものされている. このため, 当地は地質的にも剥離崩壊に伴う落石が発生しやすい地域であるといえる.

## 2.8 まとめ

本章では、落石の定義と落石発生の素因についてまとめ、落石の危険度評価のための調査手法を述べた。加えて、鳥取県内の地形地質と落石の関連について考察し、落石発生源の調査解析例を紹介している。鳥取県の地質的特性からみると、県下には落石危険地域と考えられる地質が広く分布しており、実際にそれぞれの地質分布地域において特徴的な落石が発生している。地形的特性からみると、落石の多くは地形の遷急点（浸食前線）において発生している。また、落石発生危険箇所の新しい調査手法としてポアホールカメラや熱赤外線影像法の適用例を示した。

本章で述べた落石の基本的な特性の理解と落石発生源での調査は、落石の危険性を評価する時に最も基本となるものである。そして、それらの結果、落石の危険性が高いと判断された場合は、落石がどこに到達するかを想定し対策の計画を行う。この到達位置を想定する方には、1)過去の到達例～想定する方法、2)類似した地形地質条件下での事例を参考にする方法、3)実験を参考にする方法、4)落石シミュレーションにより想定する方法などがある。一般的には、前2者の方法を採用している。しかし、昨今の解析技術の進歩とコンピューターの普及をみれば4)シミュレーションによる方法を身近なものとしなければならない。



## 参 考 文 献

- 1) 日本道路協会編：落石対策便覧，pp1-250，2000.
- 2) 道路保全技術センター編：道路防災総点検要領（豪雨・豪雪等），pp30-60，1996.
- 3) 池田和彦，小橋澄治：地形，地質からみた落石の傾向と発生予測，施工技術，1973.8
- 4) 赤井三郎：鳥取の自然をたずねて，築地書館，1997.
- 5) 谷口洋二，西村 強，精山誉志，木山英郎：鳥取県西部地震で発生した落石と 3 次元個別要素解析例，第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp401-406，2003.1
- 6) 精山誉志，谷口洋二，木山英郎，西村強：GIS を利用した斜面崩壊事例の一整理と 3 次元落石運動解析，第 38 回地盤工学研究発表会，pp2157-2158，2003. 7
- 7) 谷口洋二，増田宏己，西村 強，藤村 尚：亀裂性岩盤斜面の調査解析とその解釈，地盤と建設（地盤工学会中国支部論文報告集），vol16，no.1，pp51-56，1998.12
- 8) 鳥取地方气象台：気象月表，1997.
- 9) (財)土木研究センター：熱赤外線映像法による吹付のり面老朽化診断マニュアル，1996.