

**数値標高モデルを用いた地形解析による斜面の最頻傾斜角
および限界傾斜角の地山強度指標としての適用に関する研究**

Applications of Most Frequent Slope Angle and Critical Slope Angle to
Estimation of Strength of Slope by Topographical Analysis using Digital
Elevation Model

平成22年9月

長嶺 元二

山口大学大学院理工学研究科

学位論文題名 ; 数値標高モデルを用いた地形解析による斜面の最頻傾斜角および限界傾斜角の地山強度指標としての適用に関する研究

申請者名 ; 長嶺 元二

地すべり面のせん断抵抗角は、地すべり斜面の勾配と強い相関があることから、それを参考にして推定できるはずである。ところが、実務において地すべりの安定計算を行う場合、すべり面のせん断抵抗角は、地すべりの安全率を仮定し、すべり層厚から粘着力を推定した上で、逆算により求められている。それは地すべりの発生には斜面の傾斜角だけでなく、地質構造や植生、地下水等の要因が複雑に絡み合っており、地質の複雑な我が国では現場毎に状況が異なるため、斜面の傾斜角だけを頼りにすべり面の強度を推定するのは乱暴であるといった考えが原因していると思われる。しかし、大局的な視点に立ち、地層や岩相単位の大まかな括りで地すべり斜面の傾斜角が示す特性を把握しておけば、すべり面の強度を推定するのに大いに役立つものと考えられる。

本論文は、幾つかの地層や岩相について、50 mメッシュの数値標高モデル (DEM) を用いた地形解析による結果に基づき、地すべり地形斜面の最頻傾斜角の工学特性を明らかにするとともに、それが地すべり面のせん断抵抗角を推定するのに有意な地形指標であることを明らかにしたものである。また、自然斜面の傾斜角が地山の強度を反映して地層や岩相ごとに特徴を示すことから、自然斜面における最も急な傾斜角 (限界傾斜角) を算定し、その工学的活用について検討を加えたものである。

本論文は6つの章で構成している。

第1章では、既往研究を基に地すべり地形斜面の最頻傾斜角が地すべり面のせん断抵抗角と対比できる地形指標であることを解説し、本研究の目的が50mDEM地形解析結果に基づき、その工学的有意性を明らかにするものであることを述べた。

第2章では、DEM地形解析の概要を説明し、データの取得方法や、斜面の傾斜方位や傾斜角の求め方を示した。

第3章では、島根県東部の日本海沿岸に分布する第三紀層地帯を対象に地形解析を行い、地すべり地形斜面の最頻傾斜角の工学特性を明らかにした。すなわち、地すべり地形斜面は地質構造を反映して傾斜方位に偏りがみられるが、その最頻傾斜角の大きさには傾斜方位による違いが小さく、それは地層ごとに特有の値を示し、層序が上位になるに従って小さくなること、また、石見層群の各地層においては地すべり地形斜面の分布の多寡と関係する指標であることを示した。

学位論文の要旨

第4章では、山口県下の三郡変成岩類地帯を対象に地形解析を行い、地すべり地形斜面の最頻傾斜角の強度特性を明らかにした。すなわち、自然斜面は片理構造に規制されてNW-SE方向の斜面が多いが、地すべり地形斜面の最頻傾斜角の大きさには傾斜方位による違いが小さく、それは一面せん断試験による風化土水浸試料のせん断抵抗角とほぼ等しく、地すべり面のせん断抵抗角を推定するのに有意な地形指標であることを示した。

第5章では、自然斜面の限界傾斜角の算定方法を定義し、深層風化した花崗岩地帯を対象とした地形解析結果と、第3章に示した第三紀層地帯の地形解析結果に基づき、限界傾斜角が示す工学特性とその活用の可能性を示した。すなわち、深層風化した花崗岩地帯における限界傾斜角は、岩相の違い(構成鉱物の違い)を反映して、花崗岩、花崗斑岩、花崗閃緑岩で数度の違いがあるものの、それは本州四国連絡橋公団による花崗岩の岩盤分類におけるCL級岩盤のせん断抵抗角にほぼ相当しており、地山のせん断抵抗角と関係する可能性のある地形指標であることを示した。また、第三紀層地帯における限界傾斜角は地層ごとに特徴を示し、火砕岩で大きく、堆積岩では層序どおりの順で上位に向けて小さくなることを示した。そして、限界傾斜角は、土木地質図の凡例に示すだけで地山の強度を推定する目安が得られること、また、斜面の不安定ゾーンを抽出する等に活用できることを示した。

最後に、第6章において本研究の総括を行った。

Applications of Most Frequent Slope Angle and Critical Slope Angle to Estimation of Strength of Slope by Topographical Analysis using Digital Elevation Model

Genji NAGAMINE

Angle of shear resistance of the landslide slip surface is supposed to be able to be estimated based on the landslide slope angle because those have strong positive relationship each other. However, in actual practice, the angle of shear resistance of the slip surface is back calculated by assuming the factor of safety of the landslide and estimating the cohesion from the thickness of the landslide mass. The possible reason of this practice is considered to be that landslide occurs not only due to slope angle but also other complex factors such as geological structure, groundwater and vegetation. Since the geology of Japan is complicated and each site has different conditions, estimating angle of shear resistance of the slip surface based only on the slope angle is considered to be simplified too much. However, the slope angle can be generally useful mean for estimation of the angle of shear resistance of the slip surface, if we understand the characteristics of landslide slope angle for each geology and rock facies.

In this thesis, the characteristics of most frequent angle of landslide slope at several geology and rock faces are analyzed using 50m DEM topographical analysis. Then, the thesis discusses that those characteristics can be useful topographical index to estimate the angle of shear resistance of the landslide slip surface. Furthermore, since the natural slope angle has unique features reflecting its shear strength for each geology and rock facies, the steepest natural slope angle is defined as Critical Slope Angle and its engineering applications are studied.

This thesis is composed of the following 6 chapters:

Chapter 1 shows that the most frequent angle of landslide slope is the topographical index which can be compared to the angle of shear resistance of the landslide slip surface based on the existing studies; and shows that the purpose of this study is to reveal the engineering applications of the index using 50m DEM topographical analysis.

Chapter 2 shows the overview of the DEM topographical analysis and shows the methods of the data collection and the measurement of slope angles and directions.

In Chapter 3, the engineering characteristics of the most frequent angles of landslide slopes are revealed based on the topographical analysis on Tertiary Area at eastern Shimane Prefecture along Japan Sea coast. The landslide slope directions are affected by the geological structures, while the most frequent angles show almost no difference in relation to the slope directions. Each formation has unique most frequent angle, which is smaller in upper formation. In Iwami Group, the most frequent angles are related to the distribution of topographic slopes.

In Chapter 4, the strength characteristics of the most frequent angles of landslide slopes are revealed by analysis on Sangun Metamorphic Rock Area in Yamaguchi Prefecture. The natural slopes with NW-SE directions are dominant due to schist structure; however the most frequent angles of landslide slopes are not slope direction dependent. The most frequent angles of landslide slopes agree with the internal friction angles of the water seeped residual soil samples estimate by direct shear tests. It shows that the most frequent angles of landslide slopes are useful topographical index to estimate the angle of shear resistance of slip surface.

In Chapter 5, the calculation method of the Critical Slope Angle of the natural slope is defined, and the engineering characteristics of the critical slope angles and their possible applications are discussed based on topographical characteristics of deep weathered granite and Tertiary Area

学位論文の要旨

discussed in Chapter 3. In deep weathered Granite Area, the critical angles of slopes are similar to the angle of shear resistance of CL class rock classified by Honshu-Shikoku Bridge Authority with a few degree differences due to rock facies (composing minerals) namely, Granite, Granite Porphyry and Granodiorite. As such, the critical slope angles can be topographical index related to the angle of shear resistance of the deep weathered granite. In Tertiary Area, the critical slope angles have unique characteristics for each formation. They are larger in pyroclastic rocks compare to those in sedimentary rock. In sedimentary rocks, upper the formation, the smaller the critical slope angle. Using this characteristic, approximate shear strength estimation may be possible by showing the critical slope angles in the legends of engineering geological map. Also the critical slope angles can be useful index to find the unstable slope zones.

Chapter 6 is the summary of this thesis.

目次

	頁
第1章 序論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 本研究の着目点	5
1.3 本論文の構成	7
参考文献	10
第2章 地形解析の方法	11
2.1 数値標高モデルを用いた地形解析	11
2.2 データの取得	15
2.3 斜面の傾斜角および傾斜方位の求め方	19
参考文献	21
第3章 島根県東部の第三紀層地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角 の特性	23
3.1 対象域の概要	23
3.2 解析結果	27
3.2.1 地形の特徴	27
3.2.2 斜面の傾斜方位と最頻傾斜角	35
3.3 地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性	39
参考文献	42
第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜 角の特性と地すべり面強度との相関	43
4.1 対象域の概要	43
4.2 解析結果	46
4.2.1 地形の特徴	46
4.2.2 斜面の傾斜方位と最頻傾斜角	51
4.3 地すべり地形斜面の最頻傾斜角と地すべり面強度との相関	56
参考文献	58

	頁
第5章 強風化花崗岩地帯および第三紀層地帯における自然斜面の限界傾斜角の特性とその工学的活用	59
5.1 限界傾斜角の定義	59
5.2 深層風化した花崗岩地帯における解析	61
5.2.1 対象域の概要	61
5.2.2 解析結果	65
5.3 第三紀層地帯における解析	71
5.4 限界傾斜角の工学的活用	77
参考文献	81
第6章 総括	82

巻末資料(島根県東部の第三紀層地帯における各層の地形状況)

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

地すべりの安定解析に用いる強度定数は、すべり面の試料を用いた土質試験により求めるのが基本である。ところが、経済的な制約の他に、試料採取の困難さや、数少ない土質試験結果を地すべり全体に適用する困難さ等の理由から、地すべりの安定解析はほとんどの場合、地すべりの安全率を仮定した上ですべり層厚から粘着力を推定し、せん断抵抗角を逆算する方法が用いられている。この方法によれば強度定数の設定を機械的に行うことができる。しかし、このように設定された強度定数のうちのせん断抵抗角は現況に合わせて見繕われた値にすぎず、確かな根拠をもっているわけではない。せん断抵抗角の設定は、粘着力の設定を優先させるために疎かになりがちであるが、これを過小に評価してしまうと計算上、地下水排除工の効果が得られにくくなること等から、その設定は極めて重要である。

ところで、高速道路調査会¹⁾は、全国から道路建設工事に伴う風化岩地すべり(63事例)を収集し、一つの地すべりに対し一組の有効鉛直応力 σ_n' とせん断応力 τ の組み合わせをクーロンの破壊基準と安定解析式を用いて求め、それらを σ_n' - τ 関係図上で求め直してすべり面の強度定数を整理している。すなわち、地すべりの発生を現場での大型せん断試験に見立てて強度定数を整理している。この研究によれば、風化岩地すべりのすべり面の勾配は、地すべり上部の遷急線と地すべり末端部とを結んだ勾配とほぼ等しく、さらに、地質の違いを考慮しない場合においてもすべり面勾配とせん断抵抗角 ϕ との間にはかなり明瞭な関係があるとしている(図 1.1 および表 1.1)。

一方、吉松ら²⁾は大変位を起こした自然発生的な地すべり(約 470 事例)を全国から収集し、先の場合と同様にして地すべり斜面の勾配とすべり面の強度の関係を整理している。この場合の斜面勾配は滑落崖を含まないすべり土塊の上端と下端を結んだ勾配である。これによれば、地質の違いを考慮しない場合においても斜面勾配別に地すべりを分類すれば、 σ_n' と τ の間には比較的良い直線関係があり、せん断抵抗角 ϕ' は分類した勾配の上限値前後の値を示すとしている(図 1.2 および表 1.2)。その関係を用い無限長斜面モデルにあてはめると、粘着力 c' を無視しかつ浸透流がないと仮定すれば、地すべり斜面勾配と ϕ' はほぼ等しくなる。

上記の結果に従えば、地すべり面のせん断抵抗角は地すべり斜面勾配を参考にし適切に推定できることになる。ところが、その手法は実用化されていない。それは地すべりの発生には斜面の傾斜角だけでなく、地質構造や植生、地下水等の要因が複雑に絡み合っており、地質の複雑な我が国では現場毎に状況が異なるため斜面の傾斜角だけを指標としてすべり面の強度を推定するのは乱暴であるといった考えがあるもの

と思われる。しかし、大局的な視点に立ち、地層や岩相単位の大まかな括りで地すべり斜面の傾斜角が示す特性を把握することは、すべり面の強度を推定するのに大いに役立つものと考えられる。

本論文は、幾つかの地層や岩相についての 50 m 数値標高モデル (DEM) による地形解析結果に基づき、地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性を明らかにするとともに、それが地すべり面のせん断抵抗角を推定するのに有意な地形指標であることを明らかにしたものである。また、自然斜面の傾斜角が地山の強度を反映して地層や岩相ごとに特徴を示すことから、自然斜面における最も急な傾斜角を限界傾斜角と定義して、その工学的有意性について検討を加えたものである。

表 1.1 地すべり斜面勾配 θ とすべり面の強度定数の関係¹⁾

すべり面 勾配 θ	事例数	すべり面強度	
		上限値	下限値
0～10°	11	$c=7.8\text{kN/m}^2$ $\phi=21^\circ$	$c=0\text{kN/m}^2$ $\phi=5^\circ$
10～20°	20	$c=16.7\text{kN/m}^2$ $\phi=22^\circ$	$c=0\text{kN/m}^2$ $\phi=16^\circ$
20～30°	19	$c=11.8\text{kN/m}^2$ $\phi=27^\circ$	$c=0\text{kN/m}^2$ $\phi=22^\circ$
30～40°	13	$c=11.8\text{kN/m}^2$ $\phi=31^\circ$	$c=0\text{kN/m}^2$ $\phi=28^\circ$

注) 引用文献に示される「中間値」は削除している

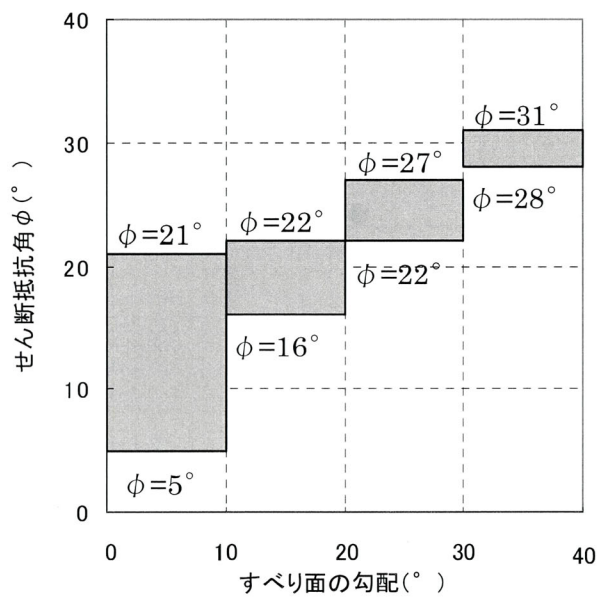


図 1.1 すべり面の勾配とせん断抵抗角の関係¹⁾

表 1.2 地すべり斜面勾配 θ と強度定数 (c' , ϕ') の関係²⁾

勾配 (°)	事例数	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	相関係数
$0 \leq \theta < 10$	46	5.69	9.0	0.944
$10 \leq \theta < 15$	132	3.33	14.8	0.951
$15 \leq \theta < 20$	127	0.39	20.7	0.935
$20 \leq \theta < 25$	95	4.31	23.6	0.941
$25 \leq \theta < 30$	40	3.92	27.9	0.930
$30 \leq \theta$	27	7.16	30.0	0.944

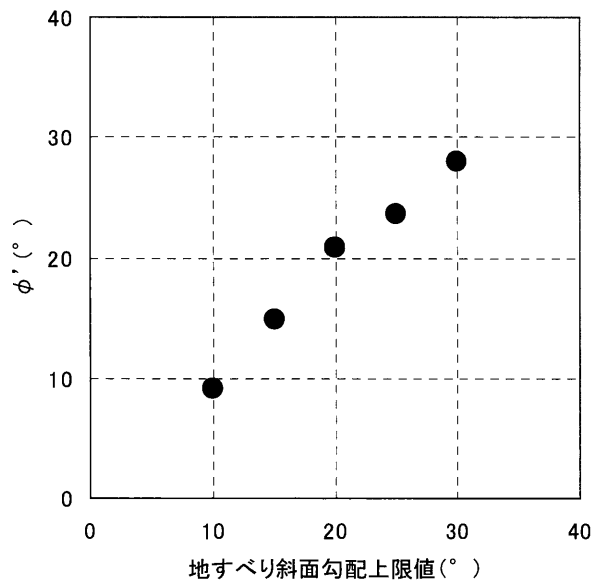


図 1.2 地すべり斜面勾配とせん断抵抗角 ϕ' の関係²⁾
 注) $10^\circ \leq \theta < 30^\circ$ の範囲をプロット

1.2 本研究の着目点

自然斜面の傾斜角は、地象・気象を踏まえたその地域特有の地形指標であることは言うまでもない。例えば、花崗岩地帯と火山岩地帯と第三紀層地帯とでは、また、多雨地帯や寒冷地帯とそうでない地帯とでは自然斜面の傾斜角はそれぞれ異なる。そして、急峻な山体を形成する地山の強度は、緩やかな山体のそれに比べて大きいと予測できるように、自然斜面の傾斜角は地山の強度を反映している。

ここで着目する自然斜面の限界傾斜角は、地形解析に用いるDEMのメッシュの大きさにおいて、自然斜面がつくり得る最も急な斜面の傾斜角である(図1.3)。それは土砂地山においては安息角と対比できる値であり、概念的には土試料におけるピーク強度に対比できるものである。

一方、地すべり地形斜面の最頻傾斜角は、地すべり地内において最も高い頻度で出現する傾斜角である(図1.3)。それは前述したように、地すべり面のせん断抵抗角と対比できる値であり、概念的には土試料における残留強度に対比できるものである。なお、ここで平均値ではなく最頻値に着目するのは、以下に原因する精度の低下を避けるためである。また何より、最頻値は傾斜角の頻度分布を整理すれば容易に把握でき、直感的(ビジュアル的)に理解しやすいためである。

1) 地質データの精度上の問題

本研究における地形解析は広域に分布する地層を対象としており、その地質データは1/5万地質図幅に示される地質境界線をもとに設定している。そのため地質区分の詳細には誤差が含まれる可能性がある。

2) 硬質な岩盤が分布する地山より取得されるデータの精度上の問題

本研究における地形解析は土砂地山を対象とするものであるが、例えば比較的軟質な凝灰岩類と硬質な溶岩が混在する不均質な第三紀層の火砕岩では、硬質な岩盤における高角度のデータが多く取得される可能性がある。

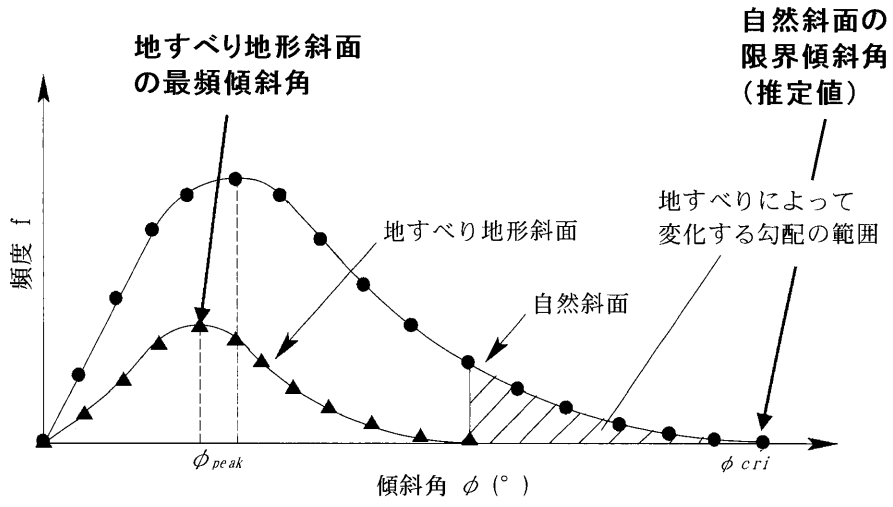


図 1.3 斜面の傾斜角の頻度分布図において着目する地形指標

1.3 本論文の構成

本論文は、6つの章で構成している。

第1章では、既往研究より地すべり地形斜面の最頻傾斜角が地すべり面のせん断抵抗角と対比できる地形指標であることを解説し、本研究の目的がDEM地形解析により求められる地形指標のうち、地すべり地形斜面の最頻傾斜角および自然斜面の限界傾斜角に着目し、それらの工学的有意性を明らかにするものであることを述べた。

第2章では、DEM地形解析の概要を説明し、データの取得方法や、斜面の傾斜方位や傾斜角の求め方を示す。

第3章では、島根県東部の日本海沿岸に分布する第三紀層地帯を対象に地形解析を行い、地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性を明らかにする。

第4章では、山口県下の三郡変成岩類地帯を対象に地形解析を行い、地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関を明らかにする。

第5章では、自然斜面の限界傾斜角の算定方法を定義した上で、深層風化した花崗岩地帯を対象とした地形解析結果と、3章に示した第三紀層地帯の地形解析結果に基づき、限界傾斜角が示す特性とその活用について示す。

最後に、第6章において総括を行った。

本論文の構成と概要を図1.4に示す。また、本論文における用語の一覧を表1.3に示す。

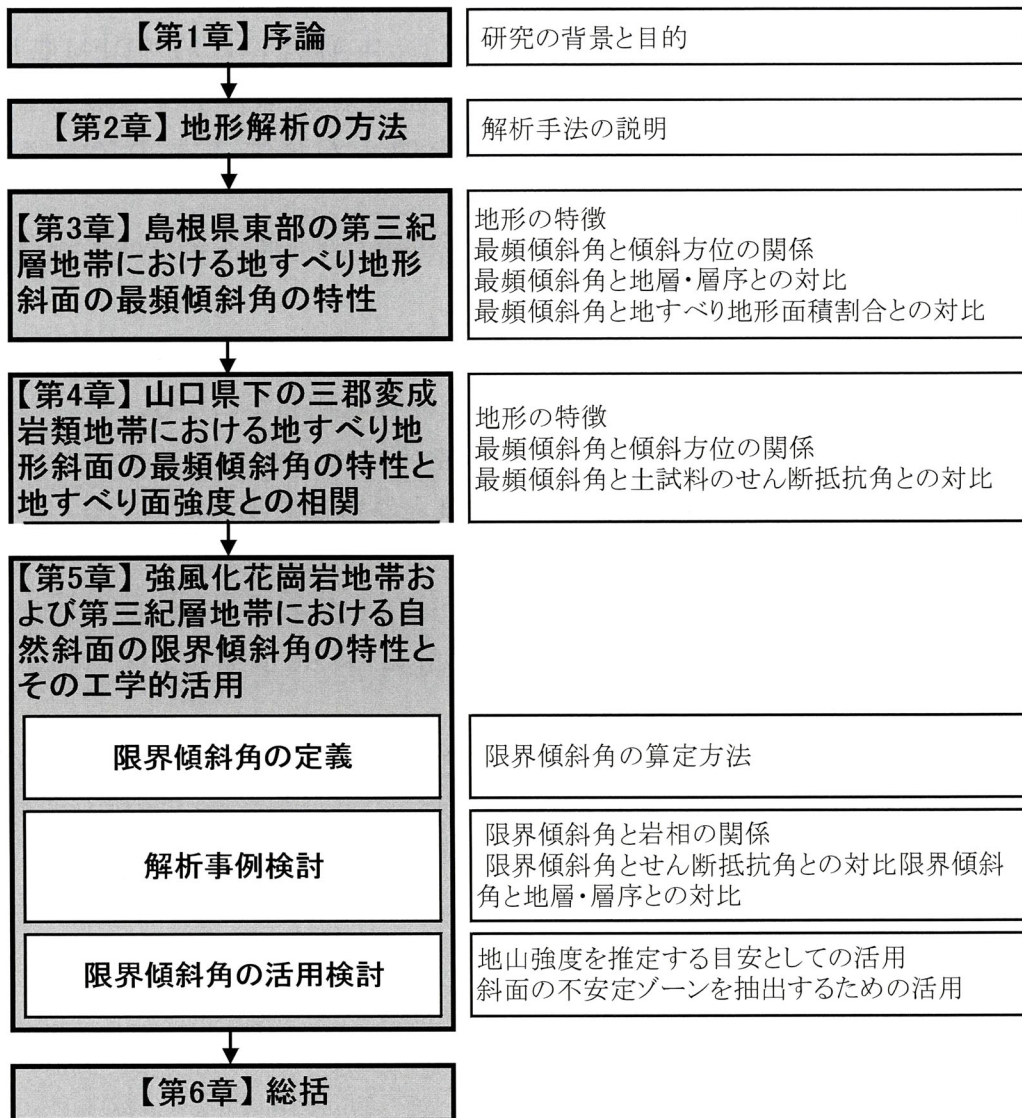



図 1.4 論文の構成と概要

表 1.3 本論文における用語の一覧

用語	意味
自然斜面	地表に露出する全ての斜面を対象とする。切土・盛土等の人工斜面を含む。ただし、沖積平野、谷底低地、河川・湖沼は除く。
地すべり地形斜面	<p style="text-align: right;">防</p> <p>防災科学技術研究所刊行の地すべり地形分布図に示される地すべり地形内にある斜面を対象とする。</p> 
傾斜角	数値標高モデル(DEM)において対象とする格子点を取り囲む 8 格子点の標高を用いて算出した平面の最大傾斜の角度。
傾斜方位	上記最大傾斜の傾斜方位 (360° 表示)。
最頻傾斜角	対象域における傾斜角の頻度分布において最も高い頻度の傾斜角。
最大傾斜角	対象域における傾斜角のうちの最大値。
限界傾斜角	対象域における傾斜角の頻度分布において、頻度が 1 となる大きい側の傾斜角を外挿して求めた値。
火砕岩	火山砕屑物 (凝灰岩類) と溶岩が混在する。

参考文献

- 1) 高速道路調査会：地すべり地形の安定度評価に関する研究報告書，1985.
- 2) 吉松弘行，丸山清輝，檜垣大介，綱木亮介，吉田克美：地すべり面の土質定数の決定手法，土木技術資料，Vol.33,No.4, pp.69-75, 1991.

第2章 地形解析の方法

2.1 数値標高モデルを用いた地形解析

地形解析は、かつては等高線印刷地図を用いて、わが国では方眼法による地形計測が1940年代より行われている。しかし、印刷地図からの読み取りにより標高を数値化し、膨大な地形データを整理するのに多大な労力を要するため、その研究の対象域は限られていた¹⁾。ところが、1997年に国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)²⁾が入手可能となって以降、地図情報システム(GIS;Geographic Information System)を活用して数値標高モデル(DEM;Digital Elevation Model)を用いた地形解析が活発に行われるようになってきている。

1) 数値標高モデル(DEM)

適当な格子間隔で代表された地表面の標高値のデジタルデータである。これを利用すれば鳥瞰図によるCGの作成等も可能であり、カーナビゲーション等の利用も可能である。近年は航空レーザ測量の発展に伴い、国土地理院でも都市地域において5mメッシュDEMの刊行が進められている。

DEMの標高の値を用いると地形の様々な特性を表現することができる。その地形量は次の二つに大別される(沖村ら³⁾)。

a) 局所地形量

対象格子点における地表面の属性を表し、格子点あるいは隣接する格子点の標高との関係で定義される。主な地形指標に、勾配・傾斜の大きさ、ラプリアン(曲率)がある。本研究ではこの局所地形量のうち、斜面の傾斜角および傾斜方位を扱っている。

b) 地域地形量

広がりをもった地域の代表値として定義される。主な地形指標に、集水面積、接峰面高度、接谷面高度、起伏量、開析度等がある。

2) 地図情報システム(GIS)

GISは従来の紙地図の地形データをデジタルデータとして取得し、その図形に関連する属性や統計データ等をデータベース化して図形データとリンクさせ、高度な表示・管理・分析を行うことを可能にした情報処理システムである。コンピュータの高速演算機能によって大量の空間データおよび空間情報の解析を行うことができる(地盤工学会⁴⁾)。

わが国においてGISの効用が大きく認識されたのは、1995年の阪神淡路大震災

の復興業務であり、これを契機にGISの必要性が広く一般に認識されるようになった。GISのデータには次の3種類がある。

a) ベクトルデータ

点(ポイント)、線(ライン)、面(ポリゴン)の図形要素として定義され、これらの図形要素にIDや属性情報、位相構造が与えられているものである。本研究では、このベクトルデータを扱っている。

b) ラスターデータ

属性情報をもった同一サイズの格子面(画素)から構成されている。地図などをスキャンした画像データ、および標高や植生分布などを表現したグリッドデータがあり、連続して細かく変化するデータの表現等に利用される。

c) TINデータ

不規則な三角形の集合体(三角網)のことであり、地形モデルの三次元表示に多く用いられる。

DEM地形解析により求められる種々の地形指標を用いて今般多くの研究が行われている。自然災害に関する研究では、斜面の傾斜角度や斜面方位、集水面積などの地理情報を他の地理情報(植生、地質、土壌など)と組み合わせ、崩壊発生の条件を解析し、斜面災害に対する各種地形指標の寄与度を評価するといった研究が主流となっている(たとえば岩橋ら⁵⁾)。

ただし、DEM地形解析を行うに当たっては、用いるDEMのメッシュ間隔を問題にする必要がある。すなわち、解析には検討対象に合ったメッシュ間隔のDEMを利用する必要がある。

図2.1は、太田⁶⁾が三浦半島に分布する第三紀層を対象に50 m DEM地形解析を行った傾斜量頻度分布である。これによれば、50 m DEMでは最大傾斜量等を指標にすると地層ごとに地形の特徴が明らかにできるが、広域の地形の特徴は把握できても斜面崩壊レベルの小規模な地形的特徴はDEMのメッシュ間隔に比べてその規模が小さいことからの確に捉えられないとしている。

一方、図2.2は、戸邊ら⁷⁾が愛知県内の風化花崗岩類を対象に航空レーザ測量による詳細DEM(1 m メッシュ)を用いて地形解析を行った傾斜角頻度分布である。これによれば、詳細なDEMを用いれば崩壊地レベルの小規模な地形的特徴が明確に捉えられ、花崗岩分布域と花崗閃緑岩分布域の地形状況は類似しているものの崩壊地内の地形状況は両岩相で異なることがわかるとしている。

これらの研究から、DEMが細密なほど細部の地形的特徴が捉えられるが、50 m DEMによる地形解析によっても広域的な地形の特徴を明確にできることがわかる。本研究では後述するように幅が100 m 程度よりも規模の大きい地すべりを対象とすることから、国土地理院により全国的に整備されている50 m DEMを用いて地形解析を行った。

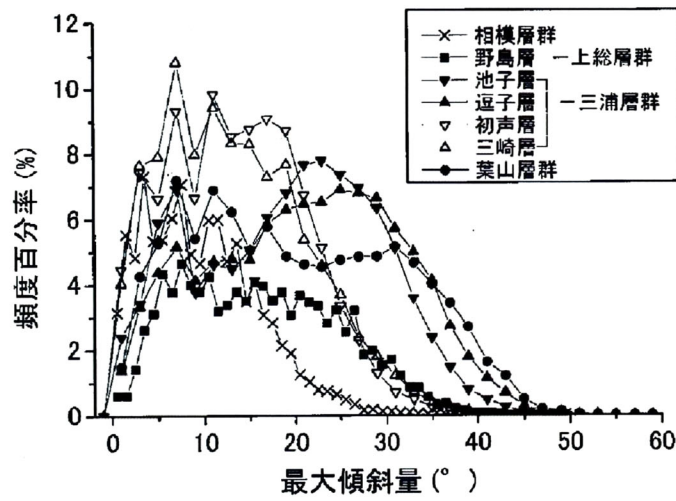


図2.1 三浦半島の第三紀層の傾斜量頻度分布⁶⁾

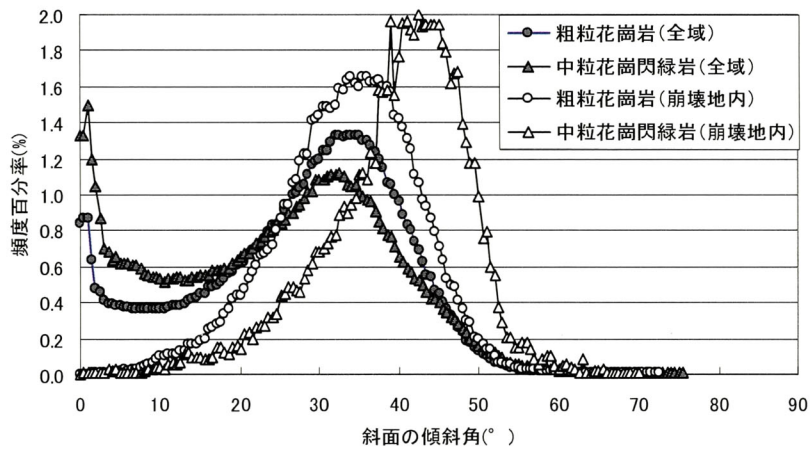


図2.2 愛知県内風化花崗岩類の傾斜角頻度分布⁷⁾
 (論文紙面をスキャンし, 汎用CADを用いて0.5°ごとに値を読みとった)

2.2 データの取得

地形解析を行うために取得したデータは、国土地理院発行(2000)の数値地図50 mメッシュ(標高)、5万分の1地質図幅、防災科学技術研究所発行の地すべり地形分布図⁸⁾である。

1) 数値地図50 m メッシュ(標高)

国土地理院より刊行されている数値地図50mメッシュ(標高)は、2万5千分1地形図の等高線から計測・計算し求められた数値標高モデルである。標高点の値は、2万5千分1地形図の区画を経度方向および緯度方向に200等分して得られる格子の中心点の標高値であり、標高点の間隔は、南北方向で1.5秒、東西方向で2.25秒、実距離で約50mである。

2) 地質図幅

地質図幅は、各対象域における産業技術総合研究所等機関発行の5万分1図幅を用いた。図幅に記される地質情報はデジタル化して取得した。

3) 地すべり地形分布図

地すべり地形分布図は、防災科学技術研究所発行のものを用いた。図2.3に地すべり地形分布図の例を示す。これは約4万分の1空中写真判読により、表層すべりを除き、地すべり、地すべり性崩壊、大規模崩壊等を5万分の1地形図上に描画したものであり、同一の判読基準によって全国の広域がカバーされている。地すべり地形斜面のデータは、滑落崖と移動体を一まとめにして取り込み、地すべり地形が複数の地層や岩相を横切る場合にはそれぞれを別の斜面として取り扱い領域(ポリゴン)を設定した。

図2.4にGISに取り込んだレイヤーの概要を示す。地質図と地すべり地形分布図に示される情報は、それぞれ別のレイヤーとしてGISに取り込んだ。

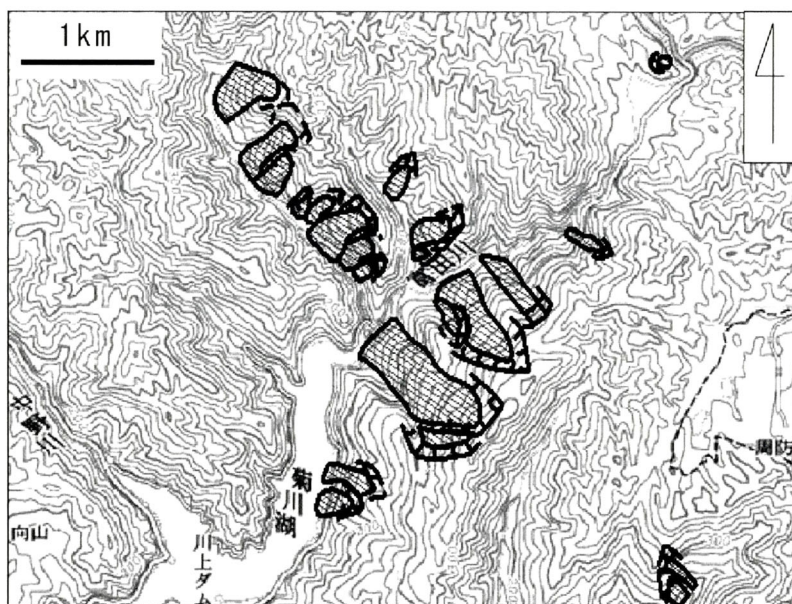


図 2.3 地すべり地形分布図の例

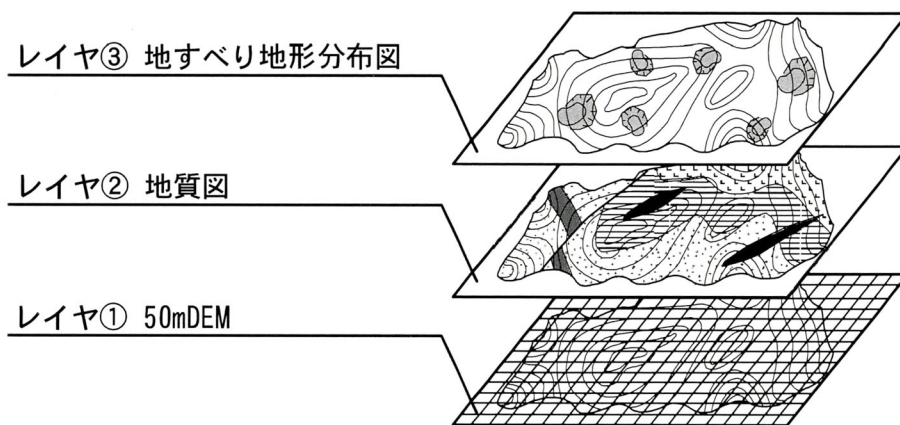


図 2.4 GIS に取り込んだレイヤー

以下に地すべり地形内の地質情報と数値地図情報を取り出す例を示す。

- ①数値地図をもとに各格子の傾斜角・傾斜方位を算出する

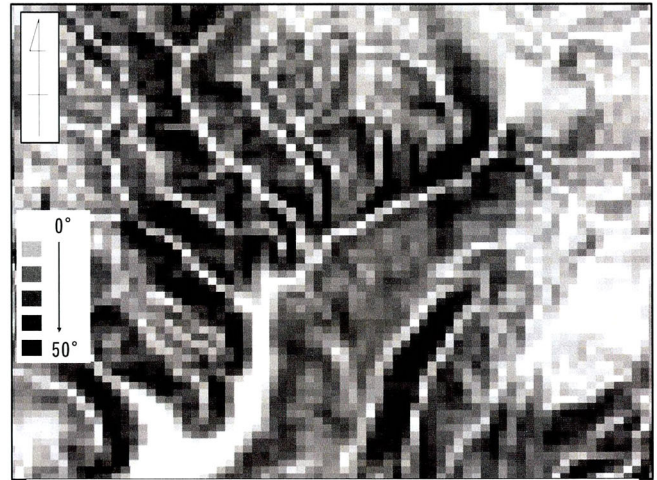


図 2.5(a) 数値地図より傾斜角・傾斜方位を算定

- ②地すべり地形分布図に示される地すべり地形をトレースし、ポリゴンを作成する



図 2.5(b) 地すべり地形のポリゴンを作成する

- ③地質図幅に示される地質境界線をトレースし、ポリゴンを作成する

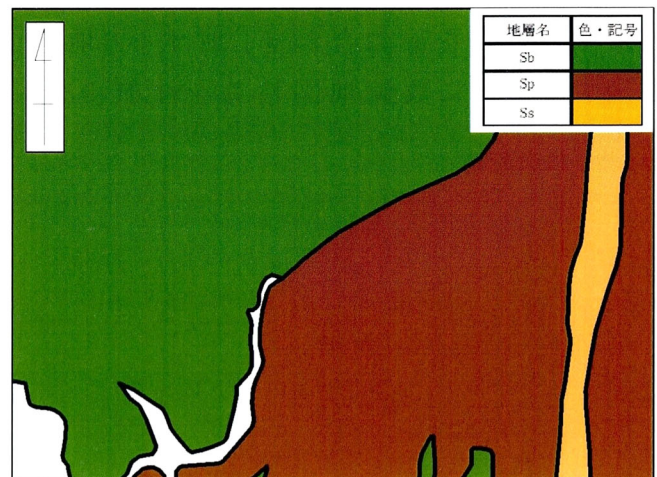


図 2.5(c) 地質ポリゴンを作成する

- ④地すべり地形ポリゴン(図2.5(b))と地質ポリゴン(図2.5(c))を重ね合わせる



図2.5(d) 地すべり地形ポリゴンと地質ポリゴンを重ねる

- ⑤地すべり地形ポリゴンに地質属性を付加する

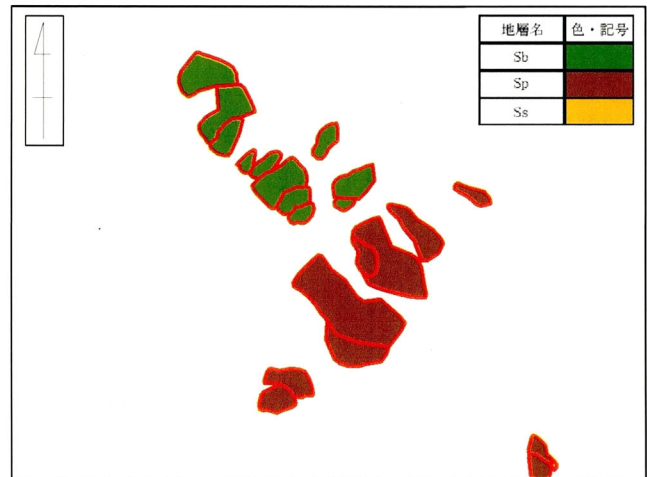


図2.5(e) 地すべり地形ポリゴンに地質情報を付

- ⑥地質属性を持たせた地すべり地形ポリゴン(図2.5(e))と数値地図(図2.5(a))を重ね合わせ, 地すべり地形ポリゴンに数値地図情報を付加する

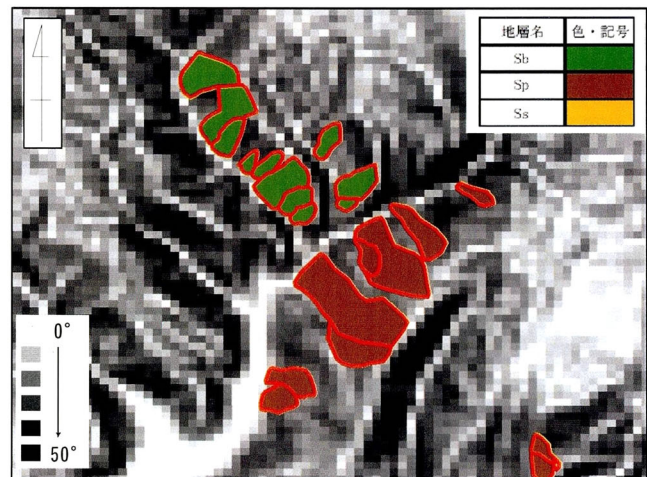


図2.5(f) 地すべり地形ポリゴンに数値地図情報を付加

2.3 斜面の傾斜角および傾斜方位の求め方

斜面の傾斜角 S を求める方法は数種類提案されている. 図 2.6 のように, 東西方向に X 軸を, 南北方向に Y 軸をとる. 計算対象とする格子点の標高を H_{22} とし, これに隣接する格子点の標高を $H_{11}, H_{12}, H_{13}, H_{21}, H_{23}, H_{31}, H_{32}, H_{33}$ とする. そして X 方向の傾斜を S_x , Y 方向の傾斜を S_y とし, 各方向の格子間距離を D_x, D_y とする.

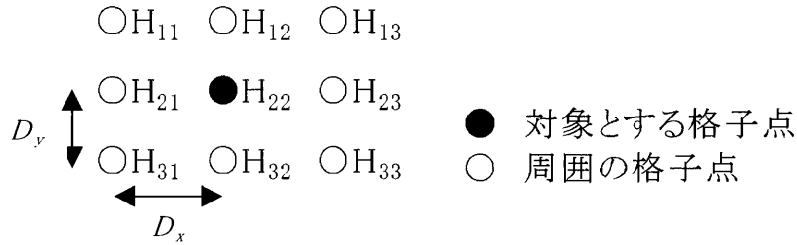


図 2.6 斜面の傾斜角, 傾斜方位を求める格子

野上ら⁹⁾は, 対象とする格子点と X 方向の隣接格子点, Y 方向の隣接格子点の 3 点の標高データから傾斜角 S を求めている(式(1)).

$$S = \sqrt{\left(\frac{H_{22} - H_{21}}{D_x}\right)^2 + \left(\frac{H_{22} - H_{32}}{D_y}\right)^2} \quad \text{式(1)}$$

Fleming and Hoffer¹⁰⁾や Horn¹¹⁾は, 対象格子点の XY 両方向に近接する 4 格子点の標高データから傾斜角 S を求めている(式(2)).

$$S = \sqrt{\left(\frac{H_{23} - H_{21}}{2D_x}\right)^2 + \left(\frac{H_{12} - H_{32}}{2D_y}\right)^2} \quad \text{式(2)}$$

沖村ら¹²⁾, 神谷ら¹³⁾, 村井¹⁴⁾, 土志田ら¹⁵⁾は, 対象格子点を中心とする 3×3 の 9 格子点の標高データから, 最小二乗法により傾斜角 S を求めている(式(3)).

$$\left. \begin{aligned}
 S &= \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \\
 S_x &= \frac{(H_{11} + H_{21} + H_{31}) - (H_{13} + H_{23} + H_{33})}{6D_x} \\
 S_y &= \frac{(H_{11} + H_{12} + H_{13}) - (H_{31} + H_{32} + H_{33})}{6D_y}
 \end{aligned} \right\} \text{式(3)}$$

また Horn¹⁶⁾は、 3×3 の 9 格子点について距離の逆 2 乗の重みづけを行い、最小二乗法により傾斜角 S を求めている(式(4)).

$$\left. \begin{aligned} S &= \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \\ S_x &= \frac{(H_{11} + 2H_{21} + H_{31}) - (H_{13} + 2H_{23} + H_{33})}{8D_x} \\ S_y &= \frac{(H_{11} + 2H_{12} + H_{13}) - (H_{31} + 2H_{32} + H_{33})}{8D_y} \end{aligned} \right\} \text{式(4)}$$

Jones¹⁷⁾は、上記の各方法のうち式(2)に示した対象格子点の周囲4格子点から求める方法が最も正確であるとしている。ただし、正確さの相違は用いるDEMの格子点間隔に依存し、岩橋¹⁸⁾は、傾斜量図による地形の判読において、傾斜の計算式の違いが判読結果に及ぼす影響は少ないと報告している。本研究では、沖村ほか¹²⁾や神谷ほか¹³⁾に倣い、採用実績の多い式(3)に従って傾斜角を算定した。これは対象メッシュを取り囲む8メッシュの標高データを用いて算出され、最小二乗法で求めた平面の最大傾斜に一致する。算出に使用したGISソフトは、PC-Mapping(MAPCON製)である。なお、傾斜方位 A_s は式(5)より算出した。

$$A_s = \tan^{-1}(S_y / S_x) \quad \text{式(5)}$$

引用文献

- 1) 太田岳洋, 八戸昭一: 数値標高モデルによる地形計測の現状と応用例, 応用地質, Vol.46, No.6, pp.347-360, 2006.
- 2) 国土地理院: 数値地図50mメッシュ(標高)日本—III, 2000.
- 3) 沖村 孝, 瀬戸島政博: 講座 地盤工学者のための地形・地質情報の活用法入門, 5. 地形解析への利用, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.43, No.11, pp.67-71, 1995.
- 4) 地盤工学会: GISの防災・環境への適用, 2007.
- 5) 岩橋純子, 山岸宏光, 神谷 泉, 佐藤 浩: 2004年7月新潟県中越地震による斜面崩壊の判別分析, 地すべり, Vol.45, No.1, pp.1-12, 2008.
- 6) 太田岳洋: 数値地図50mメッシュ(標高)による三浦半島における斜面崩壊地の地形的特徴に関する検討, 応用地質, Vol.46, No.6, pp.331-340, 2006.
- 7) 戸邊勇人, 千木良雅弘, 土志田正二: 愛知県旧小原村の風化花崗岩類における崩壊発生密度の岩相間での比較, 応用地質, Vol.48, No.2, pp.66-79, 2007.
- 8) 防災科学技術研究所: 地すべり地形分布図, 2006.
- 9) 野上道男: 50m—DEMによる地形計測値と地質の関係, 地理学評論, Vol.72A, No.1, pp.23-29, 1999.
- 10) Fleming, M.D. and Hoffer, R.M.: Machine processing of landsat MSS data DMA topographic data for forest cover type mapping. Proc. Symp. on Machine Processing of Remotely Sensed Data, LARS/Purdue Univ., Lafayette, IN 47906, pp.377-390, 1979.
- 11) Horn, B.K.P.: Hill shading and the reflectance map. Proceeding of the IEEE, Vol.69, No.1, pp.14-47, 1981.
- 12) 沖村 孝, 吉永秀一郎, 鳥井良一: 地形特性値と地形区分, 表土層厚の関係—仙台入菅谷地区を例として—, 神戸大学土地造成工学施設報告, No.9, pp.19-39, 1991.
- 13) 神谷 泉, 黒木貴一, 田中耕平: 傾斜量図を用いた地形・地質の判読, 情報地質, Vol.11, No.1, pp.11-24, 2000.
- 14) 村井俊治: 改訂版空間情報工学, 日本測量協会, 224p, 2002.
- 15) 土志田正二, 千木良雅弘, 中村 剛: 航空レーザースキャナを用いた崩壊地形解析—泥火山山体斜面を例として—, 地形, Vol.28, No.1, pp.23-39, 2007.
- 16) Hodgson, M.E.: What cell size dose the computed slope/aspect angle represent?, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.61, No.5, pp.513-517, 1995.

第2章 地形解析の方法

- 17) Jones, K.H.: A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM, *Computers & Geosciences*, Vol.24, No.4, pp.315-323, 1998.
- 18) 岩橋純子: 数値地形モデルを用いた地形分類手法の開発, 京都大学防災研究所年報, Vol.37, No.B-1, pp.141-156, 1994.

第3章 島根県東部の第三紀層地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性

島根県東部の日本海沿岸に分布する第三紀層地帯を対象に地形解析を行った。本地域を対象とした理由は、地すべりの多発地帯であるため、また、北に緩く傾斜する同斜構造をなして火砕岩・溶岩と堆積岩よりなる地層が累重し、地層ごとの地形の特徴が把握しやすいと予測されるためである。

3.1 対象域の概要

対象域は、東端を安来市飯梨川、西端を江津市都治川とし、東西約95 km、南北約10kmの範囲にある。5万分の1地質図幅では「松江」¹⁾、「今市」²⁾、「木次」³⁾、「大社」⁴⁾、「石見大田及び大浦」⁵⁾、「三瓶山」⁶⁾、「温泉津及び江津」⁷⁾、「横田」⁸⁾、「頓原」の範囲にあたる。地質データはそれぞれに対応する地質図幅より取得したが、地質図幅が未発行である「頓原」については「木次」の解説書⁹⁾に示される約6万分の1図幅を用いた。また、「横田」は地質図幅の発行年が古く第三紀層の地層区分が詳細になされていないため「松江」の解説書¹⁰⁾に示される約7.7万分の1図幅を用いた。

対象域にはグリーンタフ変動による一連の堆積物である中新統の第三紀層が分布する(図3.1)¹¹⁾。ここで対象とするのは島根半島を除く本土側の第三紀層であり、地層は図3.2に示すように下位から波多層、川合層、久利層、大森層(これらを総称して石見層群)と、布志名層、松江層(これらを総称して出雲層群)に区分されている(図3.3)。最下層の波多層より上位の地層は日本海側に向けて順に累重し、大略北に緩く傾斜する同斜構造をなしており、参考した地質図幅の解説書をもとに各地層の性状を整理すれば表3.1のようになる。

波多層は火山性陥没盆地に埋積した陸成火山岩層であり、安山岩～デイサイトの溶岩や火砕岩を主体とする。川合層は波多層を不整合に覆う海成層であり、安山岩やデイサイトの水底溶岩火砕岩に礫岩・砂岩を挟む。久利層は川合層と一部指交関係にある海成層であり、デイサイトや流紋岩の水底溶岩火砕岩に泥岩を挟む。大森層は久利層を不整合に覆う陸上-浅海底に噴出した安山岩とデイサイトよりなり、浅海性の礫岩・砂岩に被覆される。布志名層は礫岩から土丹状のシルト岩まで上方細粒化する海成層である。松江層は布志名層に引き続く海成-汽水成堆積物で、土工上は「土砂」に分類できるほど固結度の低い砂岩よりなる。

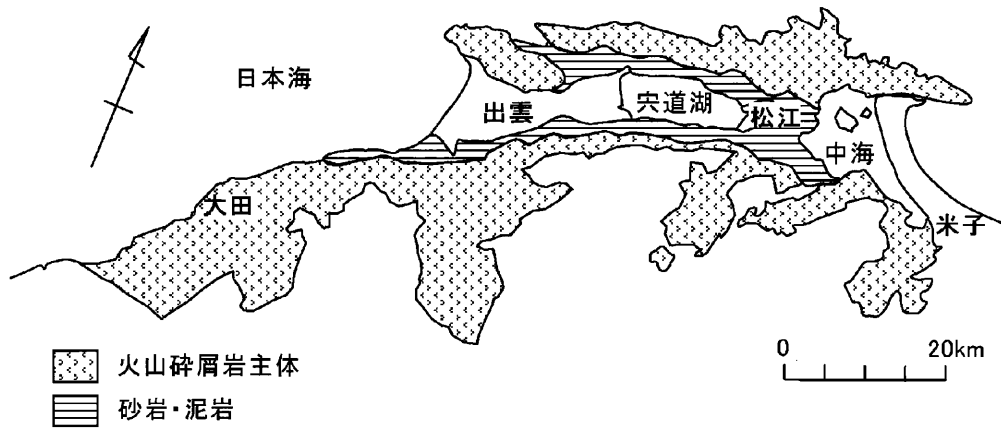


図3.1 島根県東部の第三紀層の分布(島根県1985)

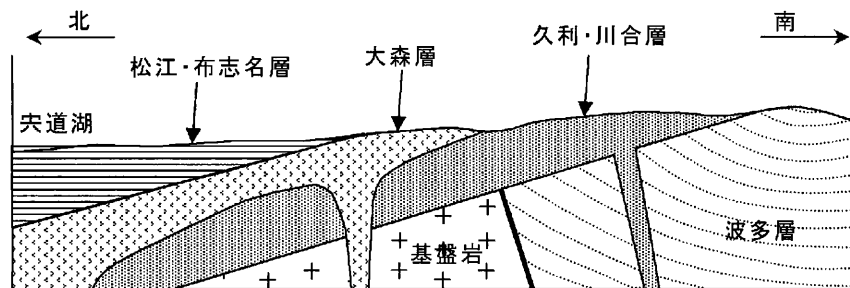


図3.2 第三紀層の地質構造の模式図
(5万分の1地質図幅「松江」を参考に作成)

表3.1 島根県東部本土側に分布する第三紀層の構成

地質年代	地層名		記号	岩相
新第三紀 中新世	出雲層群	松江層	Ma	砂岩(低固結)
		布志名層	Fm	シルト岩・泥岩
			Fj	砂岩
			Fc	礫岩
	石見層群	大森層	Oc	砂岩・礫岩
			Ov	安山岩-デイサイト溶岩火砕岩
		久利層	Km	泥岩
			Kv	デイサイト-流紋岩水底溶岩火砕岩
		川合層	Kws	砂岩・礫岩
			Kwv	安山岩-デイサイト水底溶岩火砕岩
波多層	Hv	安山岩-デイサイト溶岩火砕岩		

第3章 島根県東部の第三紀層地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性

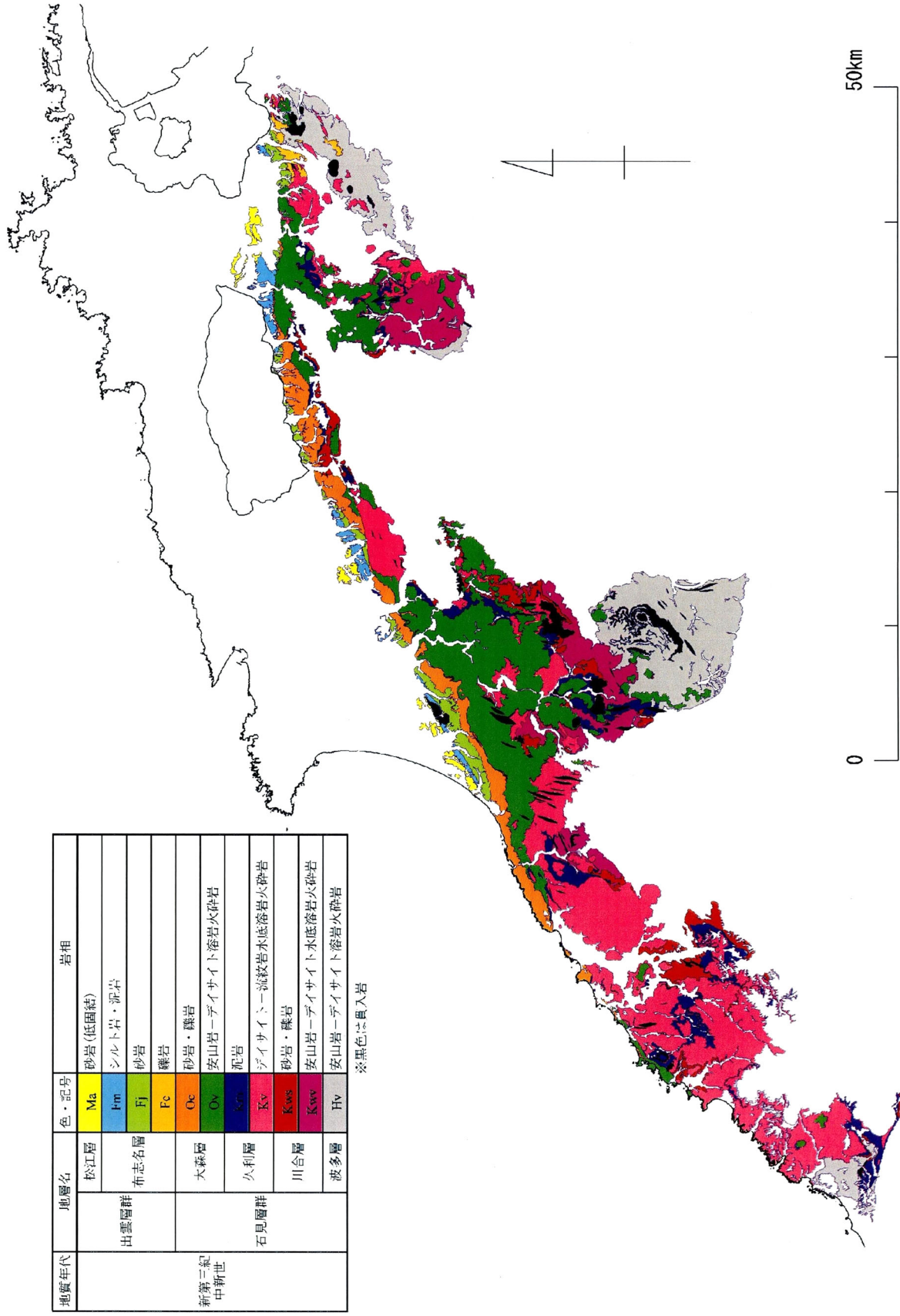


図 3.3 対象域の地層分布(参考文献1)~10)に示される地質境界をトレースして作成)

3.2 解析結果

3.2.1 地形の特徴

図3.4は計測した自然斜面および地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位を散布図に表したものである。円の中心が傾斜角 0° ，外周が傾斜角 50° を表し，同心円は 10° 刻みである。なお，傾斜方位は図3.5に示すように，北を 0° として時計回りに 360° 表示で整理している(走向を整理したものではない)。例えば，NE(北東)方向に傾斜する斜面はNとEの間(第1象限)にプロットされる。一方，図3.6は自然斜面および地すべり地形斜面の傾斜角の頻度分布である。なお，図3.4に示した散布図および図3.6に示した頻度分布(百分率表示)の拡大は巻末に添付している。

表3.2はメッシュ数の百分率から求めた各層の自然斜面と地すべり地形斜面の面積割合および最頻傾斜角を示したものである。自然斜面は沖積平野や谷底低地および河道を除き，地すべり地形斜面を含む全ての斜面を対象としている。自然斜面の面積割合は，対象とする全域の自然斜面の面積に対するその地層が占める自然斜面の面積の比，すなわち構成割合である。地すべり地形斜面の面積割合は，その地層の自然斜面の面積に対する地すべり地形斜面の面積の比である。最頻傾斜角は頻度分布を曲線近似した際のピークの傾斜角である。

上記の図表によると，自然斜面および地すべり地形斜面の分布や傾斜角は，地層ごとに特徴をもって異なることがわかる。すなわち，石見層群では，地すべり地形の分布が火砕岩(4.2~9.1%)に比べて堆積岩(9.7~15.5%)の方が多く，モンモリロナイトを多く含有する久利層泥岩(三浦¹²⁾)で分布割合が最も大きい。地すべり地形は幅が500 m 以上もある巨大なものも点在する。これに対して出雲層群では，自然斜面の傾斜角が石見層群に比べて明らかに小さく，地すべり地形の分布も少ない。地すべり地形は石見層群とは対照的に，いずれも幅が100 m 程度の小規模なものである。布志名層泥岩は軟弱な粘土薄層を挟み，非常に崩壊性の強い地層である(中村ら，1991)¹³⁾にも関わらず，その分布域に地すべり地形は判読されていない。こうした石見層群と出雲層群の地形の違いは岩盤性状の違いに原因していると考えられるが，出雲層群において地すべり地形が少ないのは，その分布域が極度に地形の開析が進んだ宍道湖周辺域の丘陵地であることに原因している。特に，布志名層は土工により小規模な地すべり・崩壊を発生しやすいが，その分布域には自然発生的な大規模地すべりを形成するほどの山地がほとんどないため地すべり地形が判読されていない。

図3.7(a),(b)にそれぞれ地すべり地形分布図，傾斜角分布図の一例を示し，写真3.1に図3.7(a),(b)中に矢印で示した地すべり地の状況を示す。また，写真3.2にその地すべり地の地山の地質である久利層泥岩の岩相を，写真3.3に火砕岩のうち凝灰岩の例として大森層凝灰岩の岩相を示す。

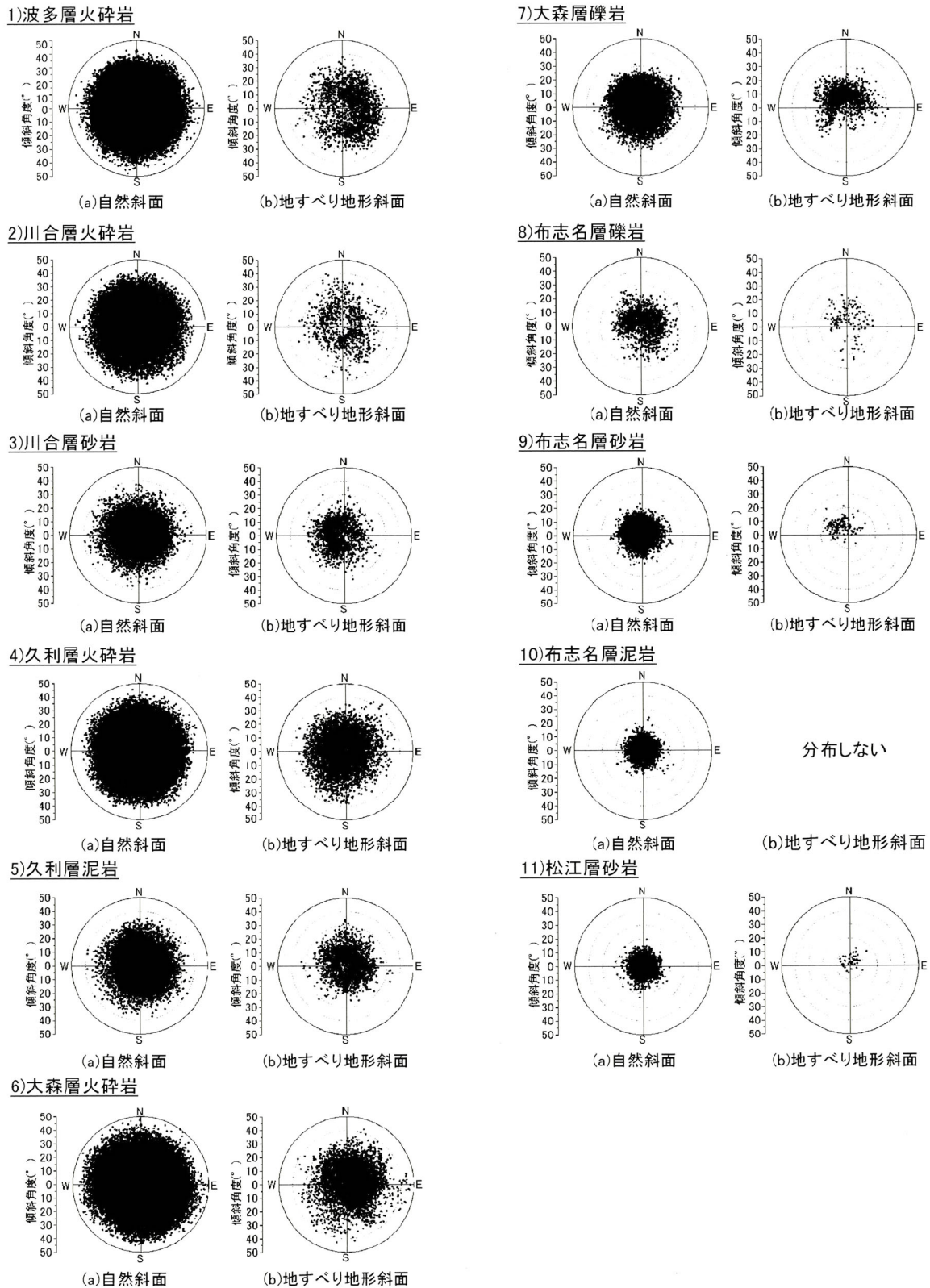


図 3.4 自然斜面および地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位を表す散布図

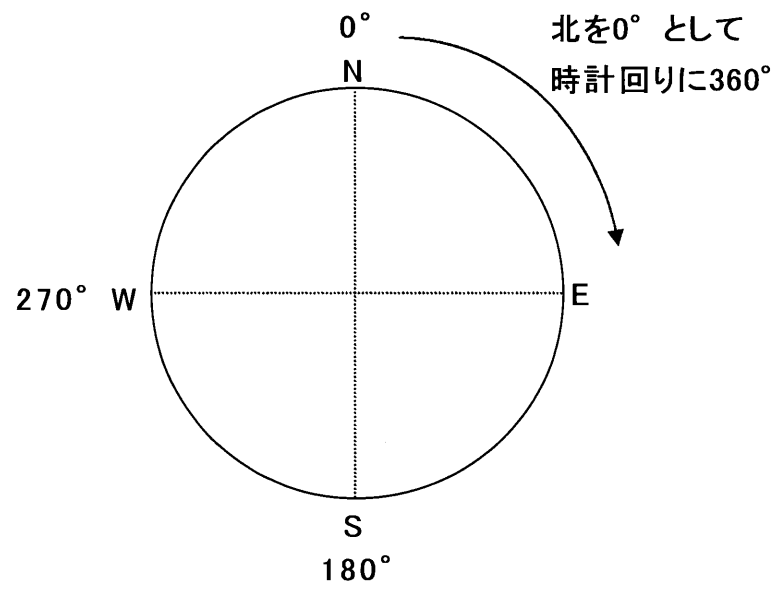
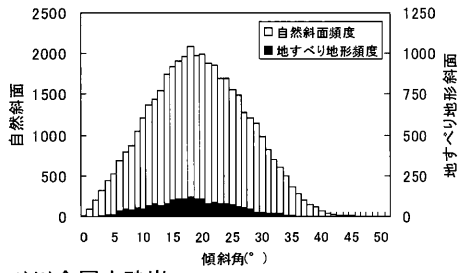
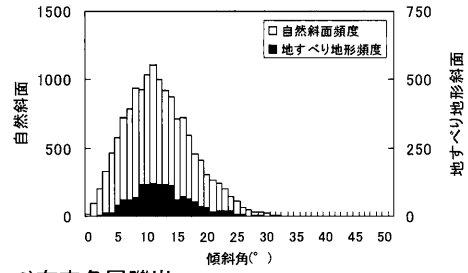


図 3.5 傾斜方位の整理の仕方

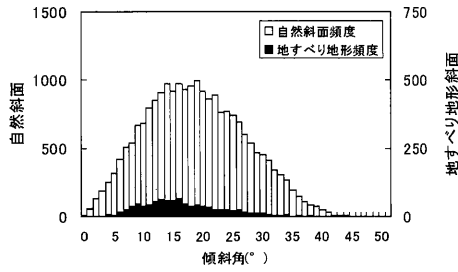
1) 波多層火砕岩



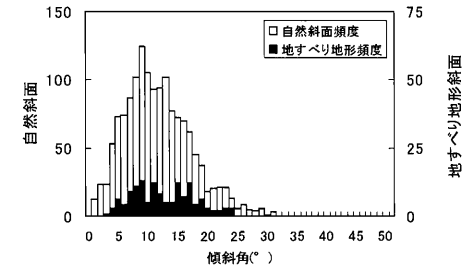
7) 大森層礫岩



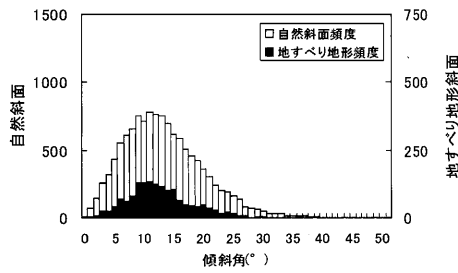
2) 川合層火砕岩



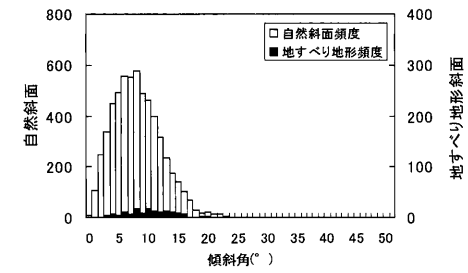
8) 布志名層礫岩



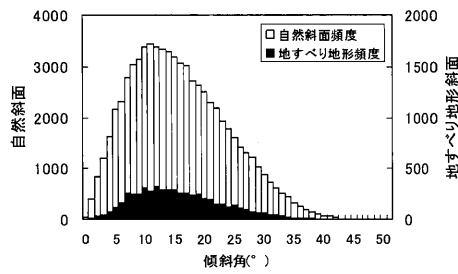
3) 川合層砂岩



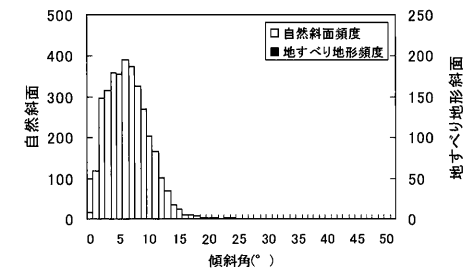
9) 布志名層砂岩



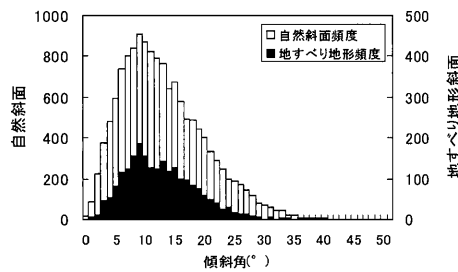
4) 久利層火砕岩



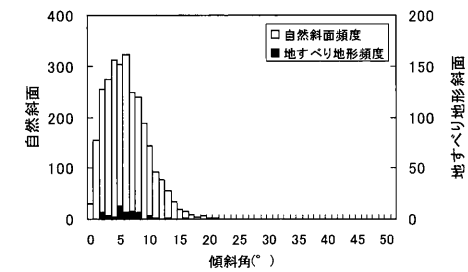
10) 布志名層泥岩



5) 久利層泥岩



11) 松江層砂岩



6) 大森層火砕岩

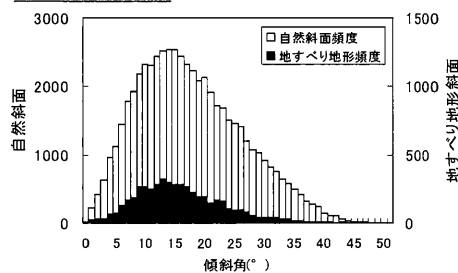
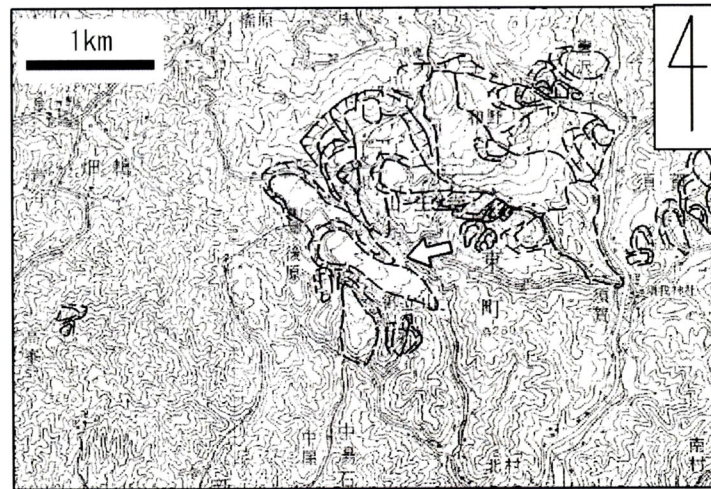


図 3.6 自然斜面および地すべり地形斜面の傾斜角の頻度分布図

表 3.2 自然斜面および地すべり地形斜面の面積割合と最頻傾斜角

地層名	岩相	記号	自然斜面			地すべり地形斜面			
			データ数	全域に占める面積割合(%)	最頻傾斜角(°)	データ数	地層に占める面積割合(%)	最頻傾斜角(°)	
出雲層群	松江層	砂岩	Ma	2792	1.1	5.5	49	1.8	6.0
	布志名層	泥岩	Fm	3462	1.4	6.0	0	0	-
		砂岩	Fj	5824	2.4	7.0	143	2.5	10.5
		礫岩	Fc	1454	0.6	11.0	136	9.4	12.5
石見層群	大森層	礫岩	Oc	14389	5.9	11.5	1398	9.7	12.5
		火砕岩	Ov	55561	22.7	15.0	5037	9.1	14.5
	久利層	泥岩	Km	14088	5.8	10.5	2189	15.5	11.5
		火砕岩	Kv	70578	28.8	13.5	5512	7.8	14.0
	川合層	砂岩	Kws	12140	5.0	12.5	1551	12.8	12.5
		火砕岩	Kwv	21697	8.9	18.0	905	4.2	15.0
波多層	火砕岩	Hv	42729	17.5	20.0	1912	4.5	18.5	



(a)地すべり地形分布図

(国土地理院 5 万分の 1 地形図『松江』『今市』および防災科学技術研究所地すべり地形分布図『松江』『今市』の一部を使用)



(b)傾斜角分布図(モザイクの一つが 50 m 格子)

図 3.7 地すべり地形分布図と傾斜量図

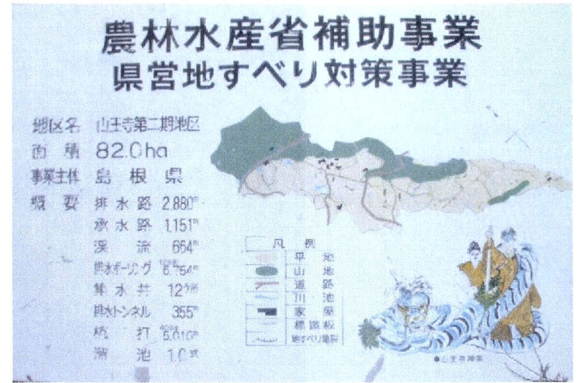


写真 3.1 第三紀層地帯の地すべり斜面
(図 3.18(a),(b)中の矢印), (幅 400 m ,長さ 2000 m ,平均傾斜角 8.5°)



写真 3.2 久利層泥岩の岩相 (写真 3.1 に示す地すべりの地山)



写真 3.3 大森層凝灰岩の岩相

3.2.2 斜面の傾斜方位と最頻傾斜角

図3.8に各地層の自然斜面の傾斜方位別面積割合を示す。また、図3.9に地すべり地形斜面の傾斜方位別面積割合を示す。この面積割合は、傾斜方位を 30° ごとに分割した際の、その傾斜方位にある斜面の面積の構成割合である。これによれば自然斜面は全体的に南向き斜面に比べて北向き斜面が多い様子が見てとれ、地すべり地形斜面についても同様の傾向が認められる。特に大森層礫岩と布志名・松江層における地すべり地形斜面は流れ盤に規制されて北向き斜面が卓越していることがわかる。

一方、図3.10に各地層の自然斜面の方位別最頻傾斜角を示し、図3.11に地すべり地形斜面の方位別最頻傾斜角を示す。これらによると自然斜面の最頻傾斜角は傾斜方位による違いは小さく、地すべり地形斜面についても、多少のばらつきはあるものの、自然斜面と同様の傾向を示すことがわかる。

図3.12は各地層の自然斜面と地すべり地形斜面の最頻傾斜角を対比したものである。火砕岩では自然斜面の方が若干大きく、堆積岩では地すべり地形斜面の方が若干大きい傾向が認められるが、両者の違いは数度以内である。

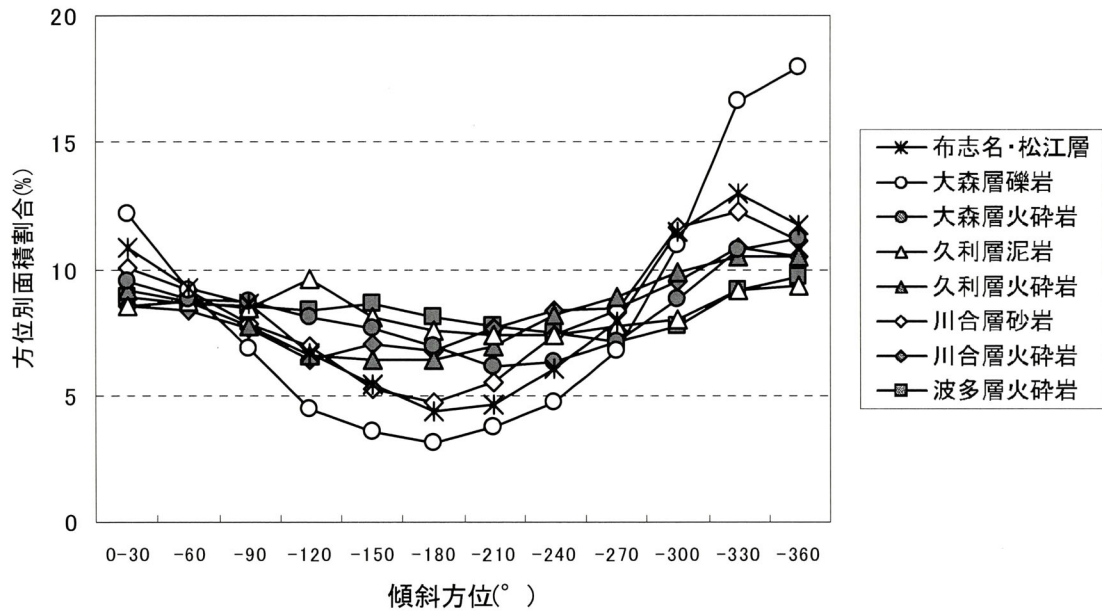


図3.8 自然斜面の方位別面積割合

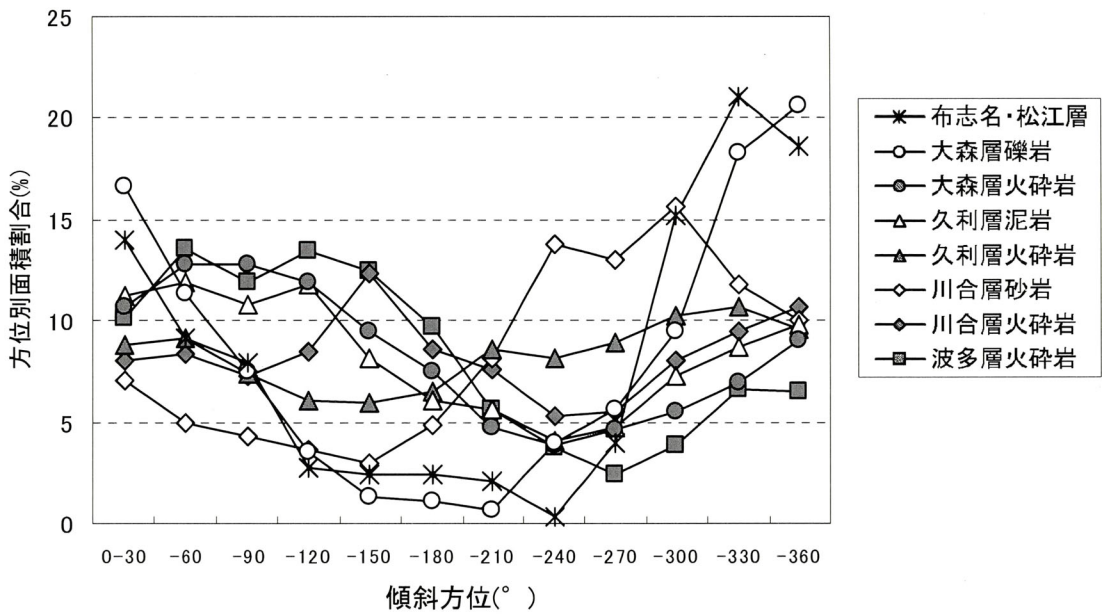


図3.9 地すべり地形斜面の方位別面積割合

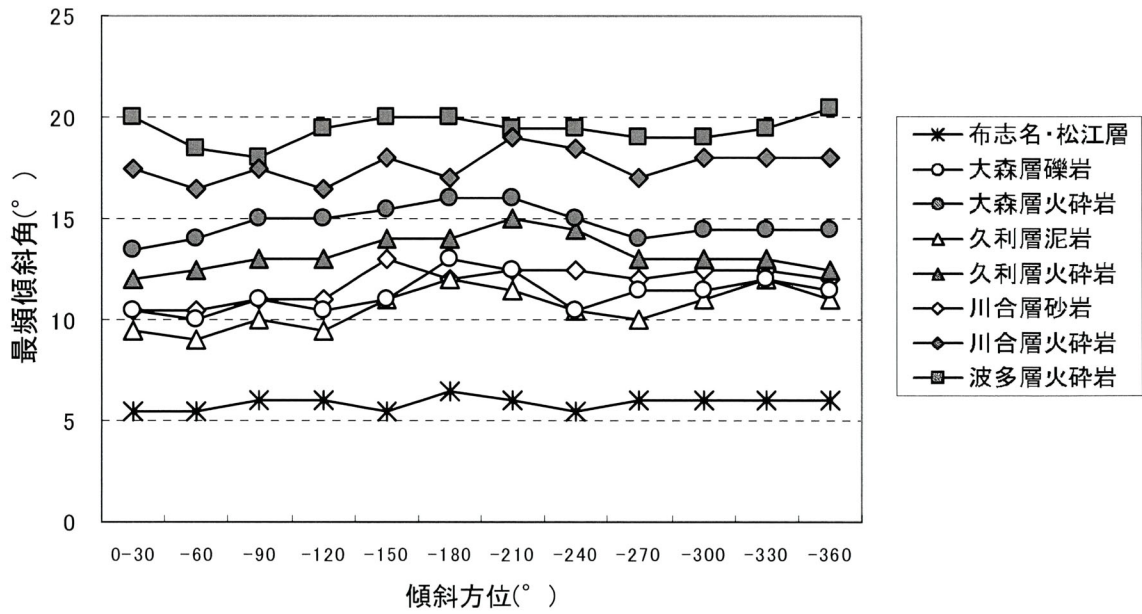


図3.10 自然斜面の方位別最頻傾斜角

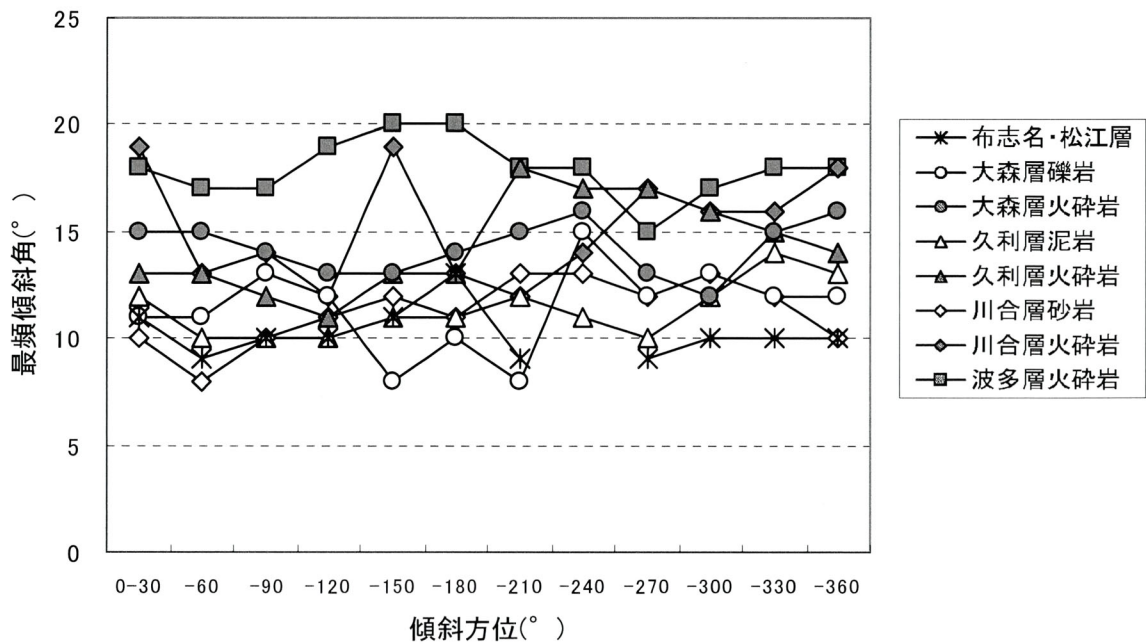


図3.11 地すべり地形斜面の方位別最頻傾斜角

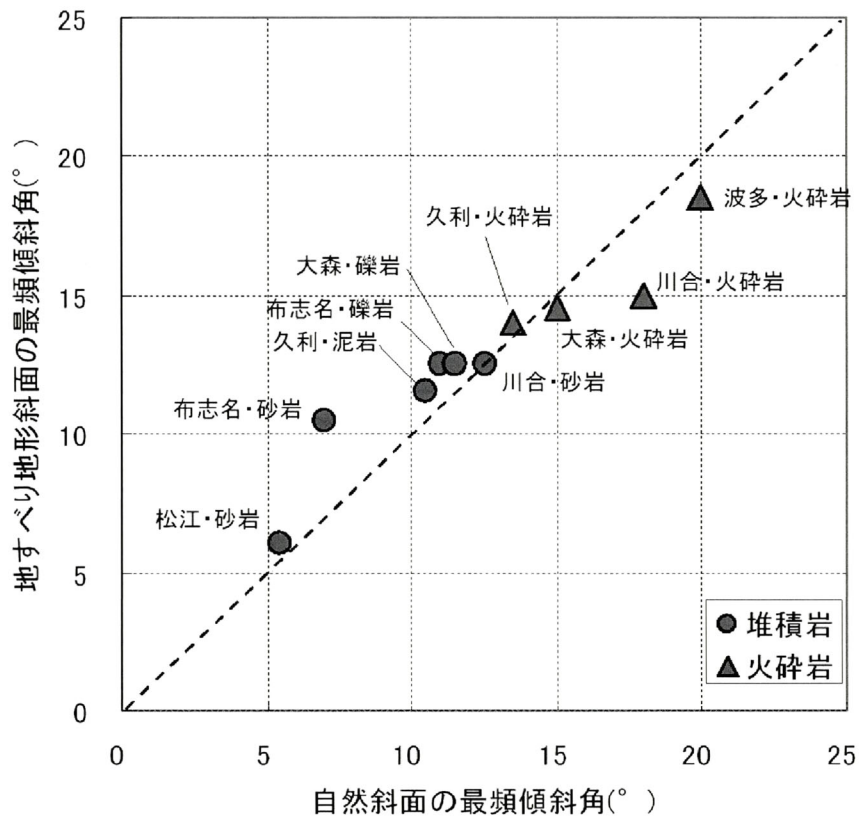


図3.12 自然斜面と地すべり地形斜面の最頻傾斜角の対比

3.3 地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性

図3.13は地すべり地形斜面の最頻傾斜角を層序順に整理したものである。石見層群の堆積岩では波多層から大森層に向けて層序が上位になるに従い最頻傾斜角が小さくなる関係が認められ、また、出雲層群の堆積岩でも同様の関係が認められる。石見層群の火砕岩ではそうした関係は認められず、 11.5° ~ 12.5° の範囲でほぼ一定しているが、全体傾向からすれば層序が上位になるに従って地すべり地形斜面の最頻傾斜角が小さくなる傾向を認めることができる。

一方、図3.14は各地層の地すべり地形斜面の最頻傾斜角と自然斜面に占める地すべり地形斜面の面積割合の関係を示したものである。この関係では、出雲層群を除き、石見層群の各地層においては最頻傾斜角が小さいほど地すべり地形の面積割合が大きくなる関係が認められる。出雲層群は地形の開析が進んだ丘陵地に分布していることから石見層群とは関係を異にするものと考えられる。

以上のことから、地すべり地形斜面の最頻傾斜角は地層ごとに特有の値を示し、石見層群の地層において認められるように、それは地すべりの分布の多寡と関連する地形指標であることが明らかである。

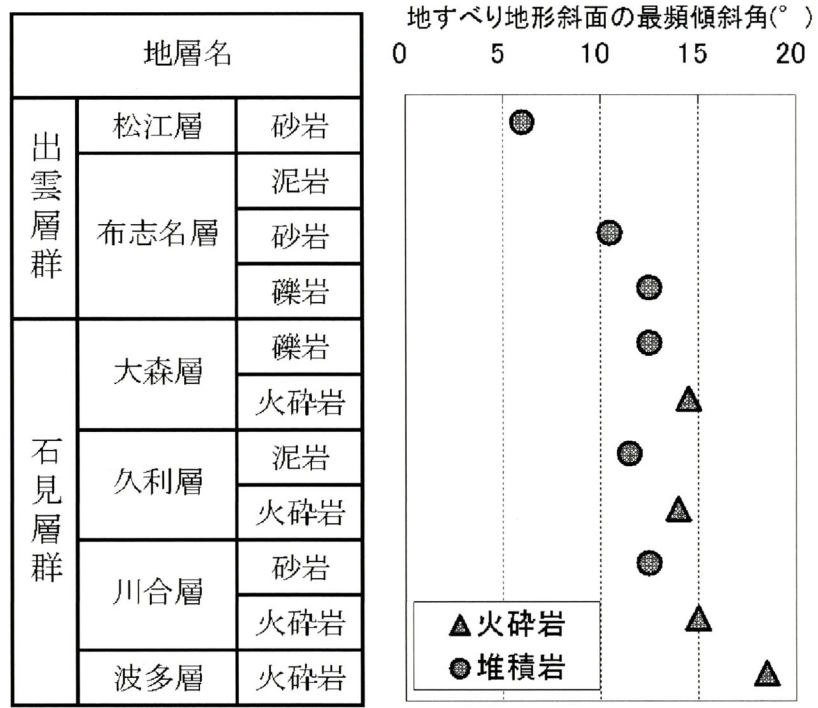


図 3.13 各層の地すべり地形斜面の最頻傾斜角

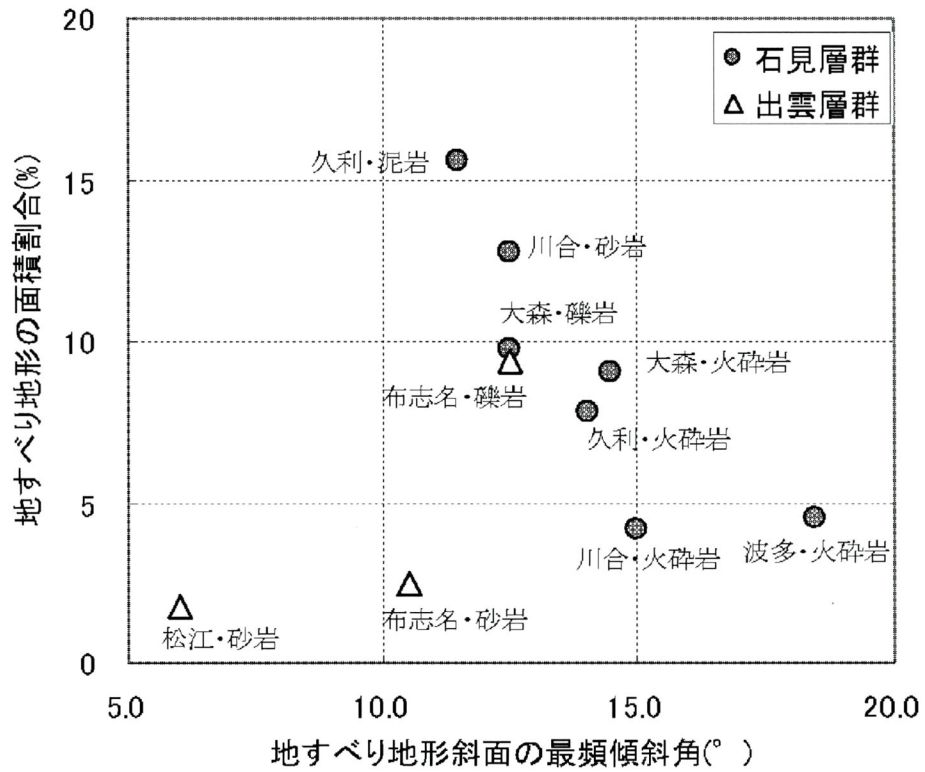


図 3.14 第三紀層地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角と地すべり地形の面積割合の関係

参考文献

- 1) 地質調査所:5万分の1地質図幅「松江」, 1994.
- 2) 地質調査所:5万分の1地質図幅「今市」, 1991.
- 3) 産業技術総合研究所:5万分の1地質図幅「木次」, 2005.
- 4) 地質調査所:5万分の1地質図幅「大社」, 1989.
- 5) 地質調査所:5万分の1地質図幅「石見大田及び大浦」, 1998.
- 6) 地質調査所:5万分の1地質図幅「三瓶山」, 1983.
- 7) 地質調査所:5万分の1地質図幅「温泉津及び江津」, 2001.
- 8) 地質調査所:5万分の1地質図幅「横田」, 1973.
- 9) 松浦浩久, 鹿野和彦, 石塚吉浩, 高木哲一:木次地域の地質, 地域地質研究報告, pp.31, 2005.
- 10) 鹿野和彦, 山内靖喜, 高安克己, 松浦浩久, 豊 遙秋:松江地域の地質, 地域地質研究報告, pp.99, 1994.
- 11) 島根県:島根県の地質, p.24, 1985.
- 12) 三浦 清:島根県下の地すべりー泥岩の岩質との関係ー, 第21回日本地すべり学会研究発表会論文集, pp.110-111, 1982.
- 13) 中村康夫, 平野 勇, 佐々木靖人, 阿部正彦:軟岩切土のり面の劣化予測, 土木研究所資料, No.2930, 1991.

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

第3章において、島根県東部の第三紀層地帯では自然斜面や地すべり地形斜面の分布が北に偏っているにも関わらず、それらの最頻傾斜角の大きさには方位による有意な違いがなく、これを工学的に活用する場合には方位の違いを考慮する必要がないこと、また、それは地層の層序順に従って上位の地層ほど小さく、石見層群の各層においては地すべり地形の分布の多寡と相関し、地すべり斜面の強度を反映した地形指標であることを示した。

第4章では、山口県下の三郡変成岩類を対象に行った地形解析の検討結果を示す。結晶片岩は片理面沿いの強い剥離性により斜面災害に対して特に注意を要する地質であり、片理構造に伴う異方性を有するため地形解析の対象にするには取り扱い難い地質である。しかし、後述するように山本らによりその斜面災害調査において土試料のせん断試験が多数実施されており、地すべり地形斜面の最頻傾斜角と土試料のせん断抵抗角を対比するための資料が揃っていることから地形解析の対象とした。

本章では、山口県下の三郡変成岩類地帯の地形・地質状況を概説した上で、第3章の場合と同様に最頻傾斜角の大きさと方位の関係等、その特性を明らかにするとともに、山本らの研究資料をもとに地すべり地形斜面の最頻傾斜角と土試料のせん断抵抗角の相関を明らかにする。

4.1 対象域の概要

山口県においては県土の面積の9.4%に三郡変成岩類が分布する。ただしデータの取得は、5万分の1図幅における「宇部」、「宇部東部」、「野島」、「光」の地すべり地形分布図が未発行であることから対象外とした(対象外としたエリアには県下の三郡変成岩類のうちの約3.4%が分布する)。

山口県下の三郡変成岩類は狭義の周防変成岩類(約2.2億年前の中生代三畳紀)に相当するものである。中生代白亜紀後期に花崗岩類の進入を受けてホルンフェルス化していることが多く、県中央から東部にかけて非常に不規則な形状をなして細長く分布する(図4.1)¹⁾。既往文献²⁾によれば地質構造は表4.1に示すとおりであり、県東部の錦周辺、県南東部の周南周辺、県中央部の山口周辺でそれぞればらつきがあるとされている。

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

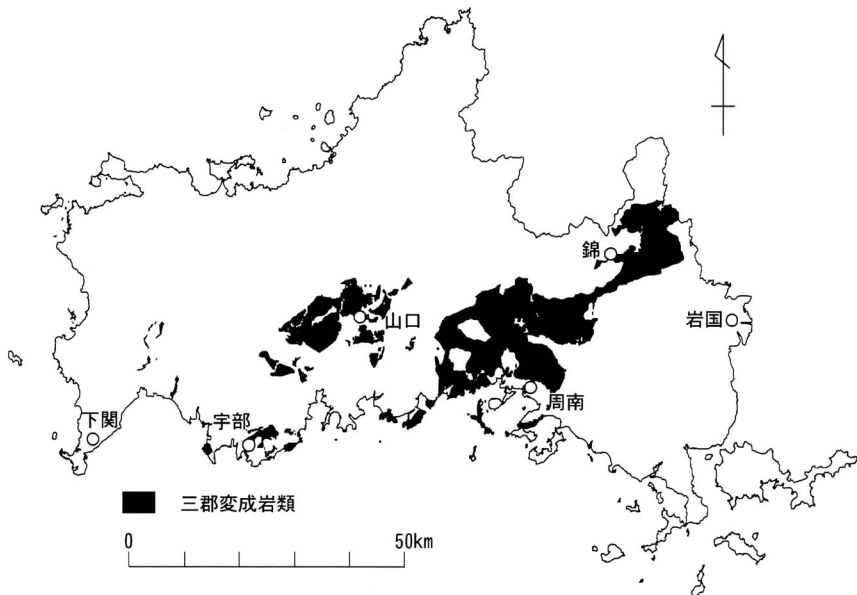


図 4.1 山口県下の三郡変成岩類

表 4.1 山口県下の三郡変成岩類の地質構造

岩体	岩相	構造
錦周辺	泥質片岩，塩基性片岩を主体とする	NE-SW～E-W を軸とする褶曲を繰り返す
周南周辺	泥質片岩を主体とする	N-S 走向で 40～60° W の単斜構造
山口周辺	泥質片岩を主体とする	NE-SW～E-W 走向で単斜構造ないし同方向を軸とする褶曲を繰り返す

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関



写真4.1 泥質片岩の岩相

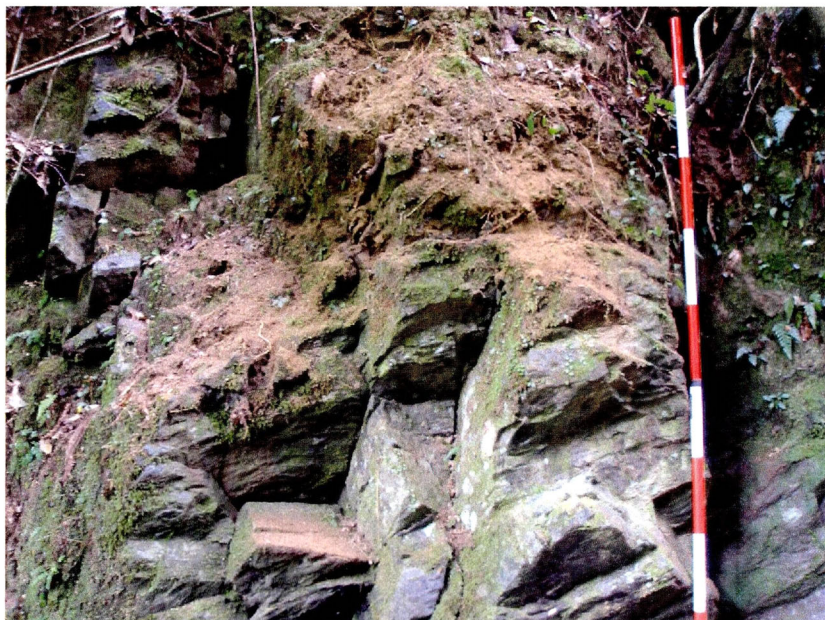


写真4.2 ホルンフェルス化し部分的に塊状岩盤となった泥質片岩

4.2 解析結果

4.2.1 地形の特徴

表 4.2 に岩相別の分布面積を示す。各岩相の分布面積は泥質片岩が 474.8km^2 で圧倒的に多く、三郡変成岩類全体の 82.8%を占める。次いで塩基性片岩が 77.8km^2 (13.6%)、砂質片岩が 19.7km^2 (3.4%)であり、珪質片岩は 0.9km^2 (0.2%)に過ぎない。そのなかで地すべり地形は大小合わせて 332 斜面判読されており、それらのほとんどが泥質片岩と塩基性片岩に分布している。分布面積に対する地すべり地形斜面の面積割合は、泥質片岩、塩基性片岩、珪質片岩で 1.5~2.0%、砂質片岩で 0.5%である。

図 4.2 は自然斜面における各計測点の傾斜方位の頻度を示したものである。データ数の少ない珪質片岩を別として、泥質片岩、塩基性片岩、砂質片岩のいずれも NW~W と SE~E 方向の斜面が相対的に多い傾向がある。一方、図 4.3 は自然斜面における各計測点の傾斜方位と傾斜角を表す散布図を示したものである。この図は円の中心が傾斜角 0° 、外周が傾斜角 50° を表し、同心円は 10° 刻みで、NE (北東) 方向に傾斜する斜面は N と E の間 (第1象限) にプロットされる。これによれば、泥質片岩、塩基性片岩、砂質片岩のいずれも自然斜面の傾斜角は傾斜方位による顕著な偏りを示さない様子が見られる。

図 4.4 はデータの豊富な泥質片岩と塩基性片岩について、地すべり地形斜面における傾斜角と傾斜方位を表す散布図を示したものである。これによると泥質片岩では地すべり地形斜面が NW 方向に傾斜するものが多い様子が見てとれる。その状況を明確にするために両岩相のデータを集計し、自然斜面および地すべり地形斜面の方位別頻度分布を図 4.5 に整理した。各々のデータ数が極端に異なるため百分率表示している。これによれば、自然斜面は NW 方向と SE 方向がやや多い楕円形の分布を示すのに対して、地すべり地形斜面はデータ数が少ないためばらつきがあるものの、圧倒的に NW 方向の斜面の分布が多いことがわかる。その原因の一つに、図 4.6 および写真 4.3 に示すとおり、NW 方向に傾斜する幅 750m、長さ 1,000m におよぶ地すべり地形斜面群が錦町北方に2箇所分布しており、この斜面から取得したデータが地すべり地形全体の約 17%を占めることが挙げられる。図 4.2 に示した自然斜面の頻度分布状況、および表 4.1 に示した地質構造からすれば、NW 方向の斜面が流れ盤になりやすいものと推察できる。

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

表 4.2 自然斜面および地すべり地形斜面の面積割合

岩相	データ数	自然斜面		地すべり地形斜面			
		面積 (km ²)	面積割合 (%)	斜面数	面積 (km ²)	面積割合 (%)	分布割合 (%)
泥質片岩	180,941	474.8	82.8	248	6.93	82.6	1.5
塩基性片岩	29,853	77.8	13.6	71	1.34	16.0	1.7
砂質片岩	7,389	19.7	3.4	11	0.10	1.2	0.5
珪質片岩	520	0.9	0.2	2	0.02	0.2	2.0
合計		573.2	100	332	8.39	100	

注1) 自然斜面の面積割合は、対象全域の自然斜面の面積に対する、その岩相が占める自然斜面の面積の比、すなわち構成割合である。

注2) 地すべり地形斜面の面積割合は、対象全域に分布する地すべり地形斜面の面積に対する、その岩相に分布する地すべり地形斜面の面積の比、すなわち構成割合である。

注3) 地すべり地形斜面の分布割合は、その岩相の自然斜面の面積に対する、地すべり地形斜面の面積の比である。

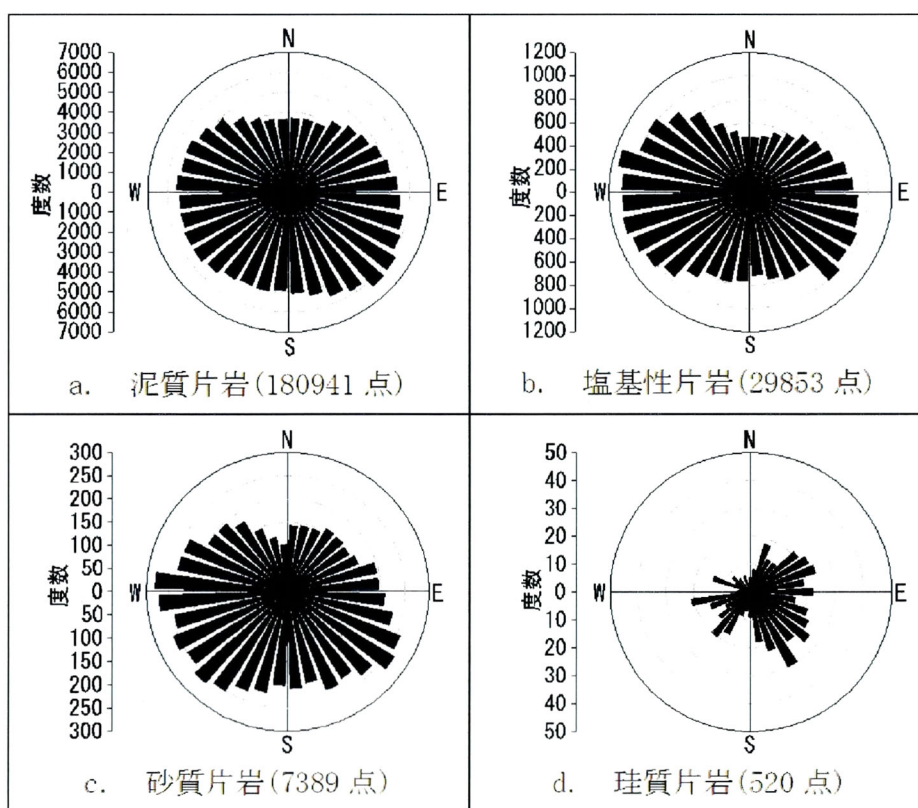


図 4.2 自然斜面の傾斜方位と計測点数の関係

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

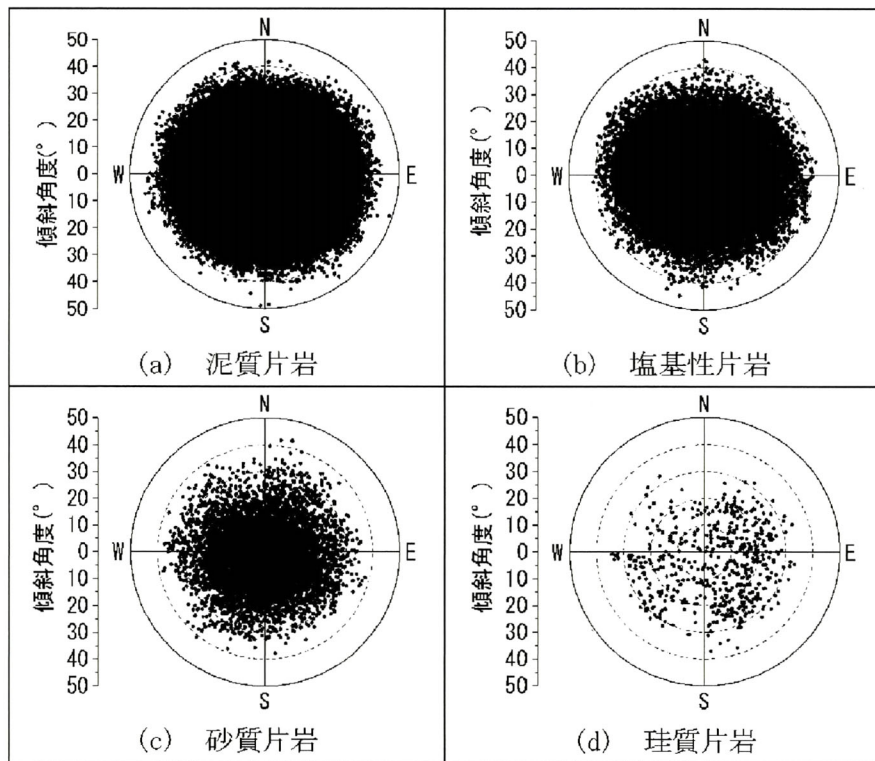


図 4.3 自然斜面の傾斜角と傾斜方位散布図

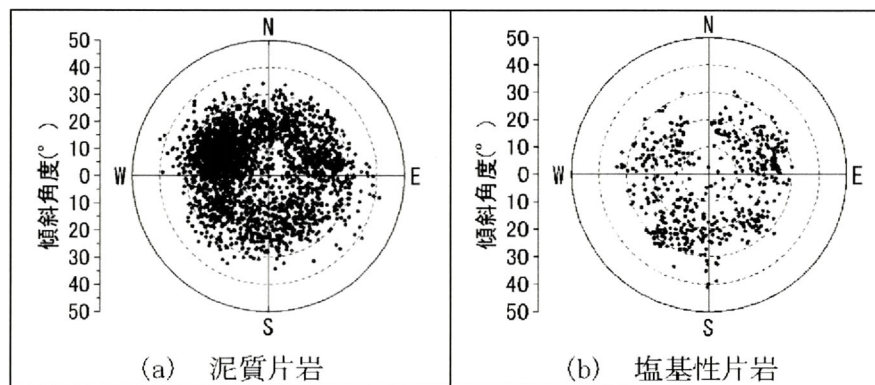


図 4.4 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位散布図

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

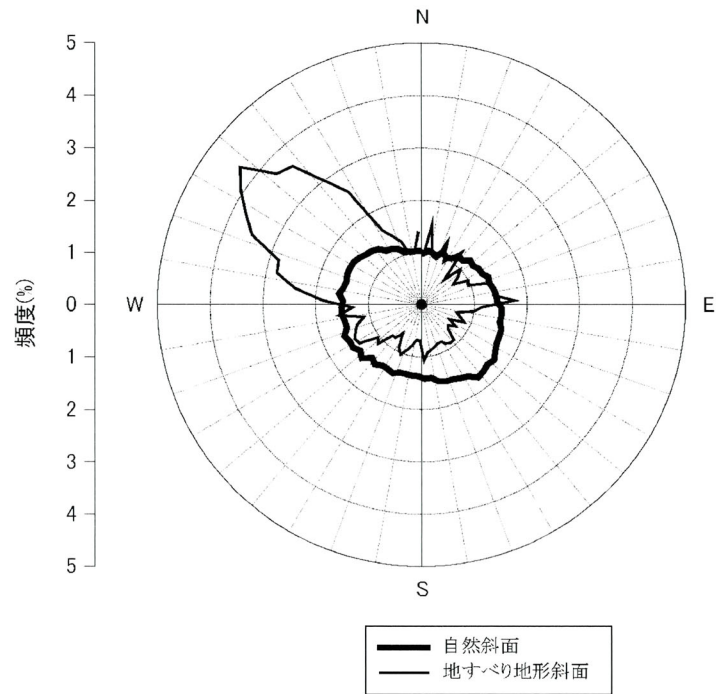


図 4.5 自然斜面及び地すべり地形斜面の傾斜方位と頻度

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

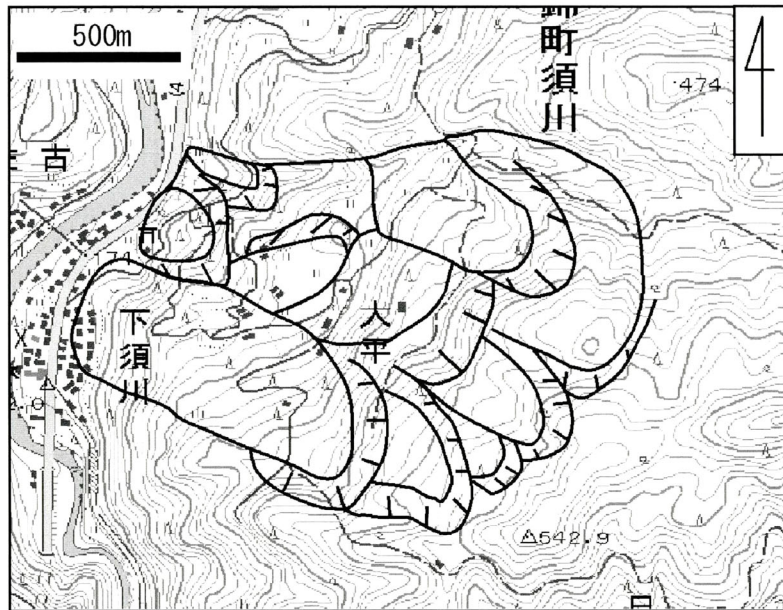


図 4.6 錦町北方の巨大な地すべり地形

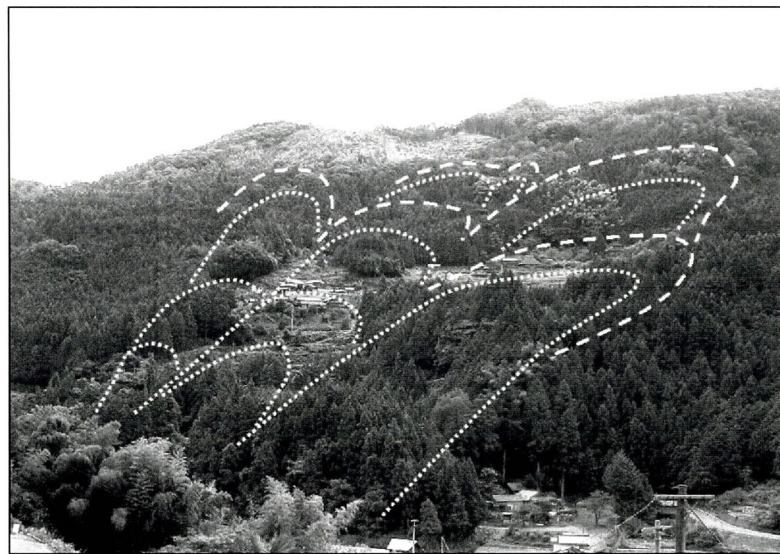


写真 4.3 錦町北方の地すべり地形斜面
(点線が地すべり移動体, 破線が滑落崖を示す)

4.2.2 斜面の傾斜方位と最頻傾斜角

図 4.7 にデータ数の少ない珪質片岩を除く各岩相の、自然斜面の傾斜角の頻度分布を示す。岩相によってデータ数が極端に異なるため百分率表示している。いずれの岩相でも最頻値は 4.5～5.0%の範囲にあり、その傾斜角は大きいものから順に塩基性片岩、泥質片岩、砂質片岩である。一般性状からしても岩盤の風化に対する抵抗力がこの順で大きいと推察できるが、その分布の類似性より泥質片岩と塩基性片岩の岩盤性状に大きな違いがないと考え、以下の整理ではデータ数の少ない砂質片岩を除き、泥質片岩と塩基性片岩のデータをまとめて扱った。

図4.8および図4.9は、泥質片岩と塩基性片岩のデータを合わせた自然斜面と地すべり地形斜面の最大傾斜角と最頻傾斜角を傾斜方位別に散布図および展開図に整理したものである。最大傾斜角は計測データにおける最大値である。これらによると次のことがわかる。すなわち、最大傾斜角は自然斜面では42～43° でほぼ一定しており、傾斜方位による違いがほとんどない。しかし、地すべり地形斜面ではデータ数が少ないためかなりばらつきがあるものの、NW方向とSE方向では傾斜角が大きくなる傾向が明らかであり、傾斜方位による違いが認められる。これらの方向で自然斜面と地すべり地形斜面の最大傾斜角がほぼ等しくなっているのは、NW方向では流れ盤による比較的規模の大きい地すべりを生じやすく、地すべりの滑落崖に当たる急斜面が自然斜面においても最大傾斜角を示しているためと考えられる。その反対にある受け盤側のSE方向斜面も同様と考えられる。

一方、最頻傾斜角は、自然斜面では16° 前後でほぼ一定しており、また地すべり地形斜面もデータ数が少ないためばらつきがあるものの、22° 前後でほぼ一定しており、何れも傾斜方位による違いがほとんどない。

図4.10に自然斜面と地すべり地形斜面の傾斜角の度数分布(百分率表示)を示す。地すべり地形斜面の傾斜角は23-24° が最頻値であり、ばらつきを考慮しても20-25° に卓越している。

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

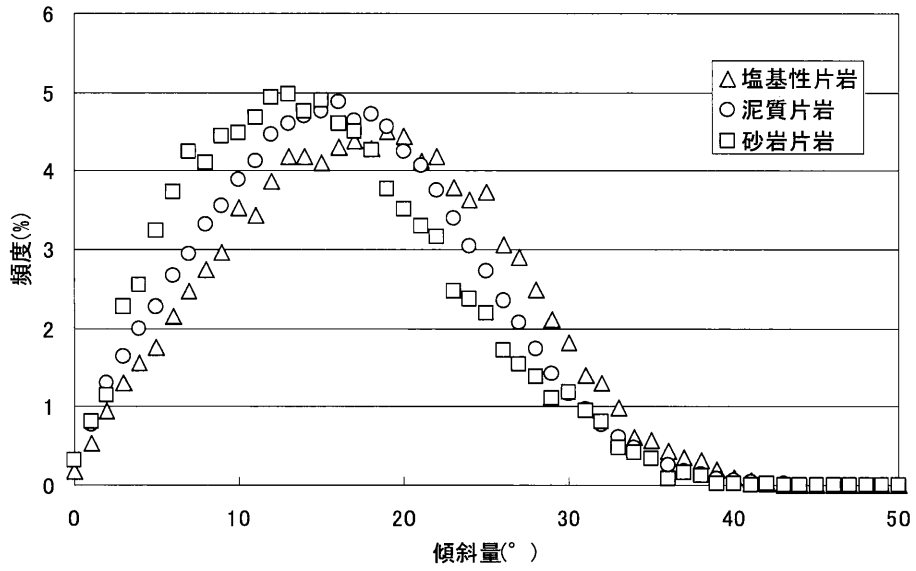


図 4.7 岩相別の自然斜面傾斜角頻度分布

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

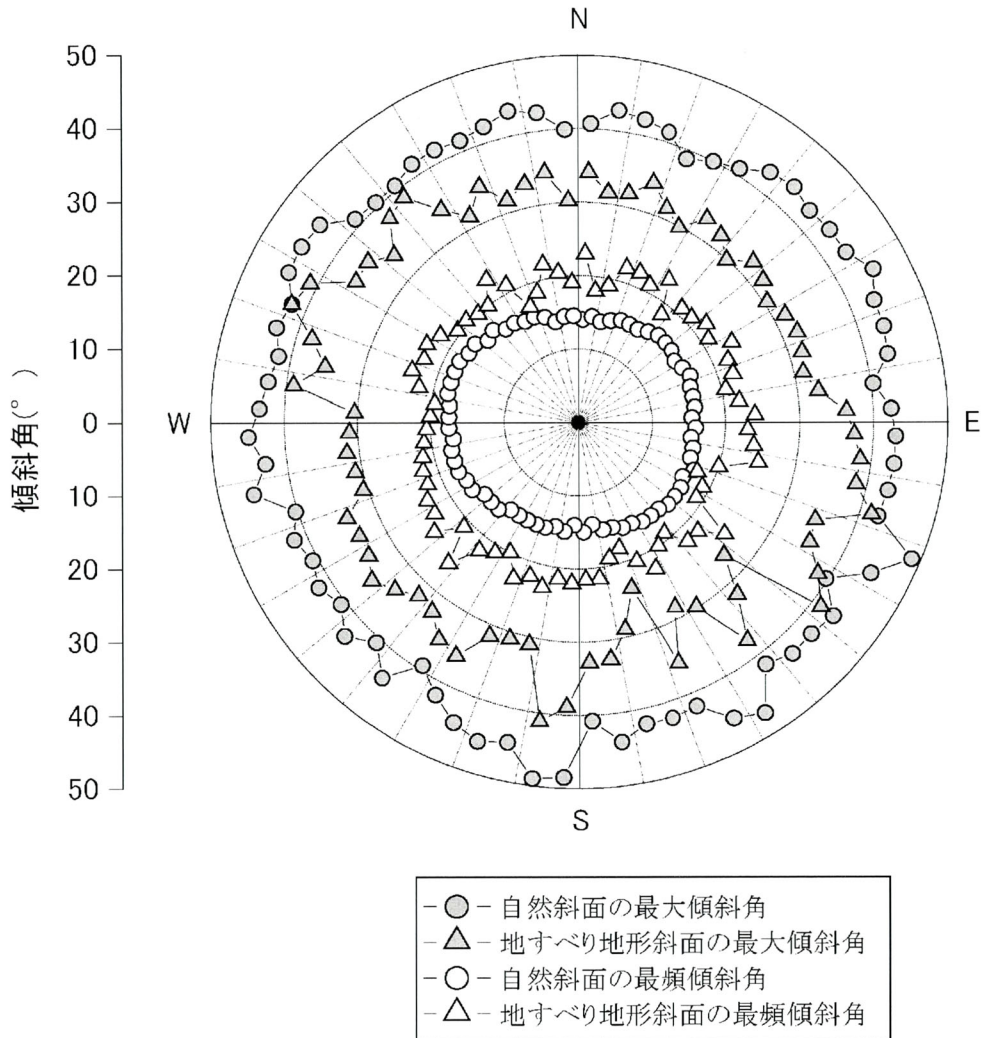


図 4.8 自然斜面および地すべり地形斜面の傾斜方位と傾斜角

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

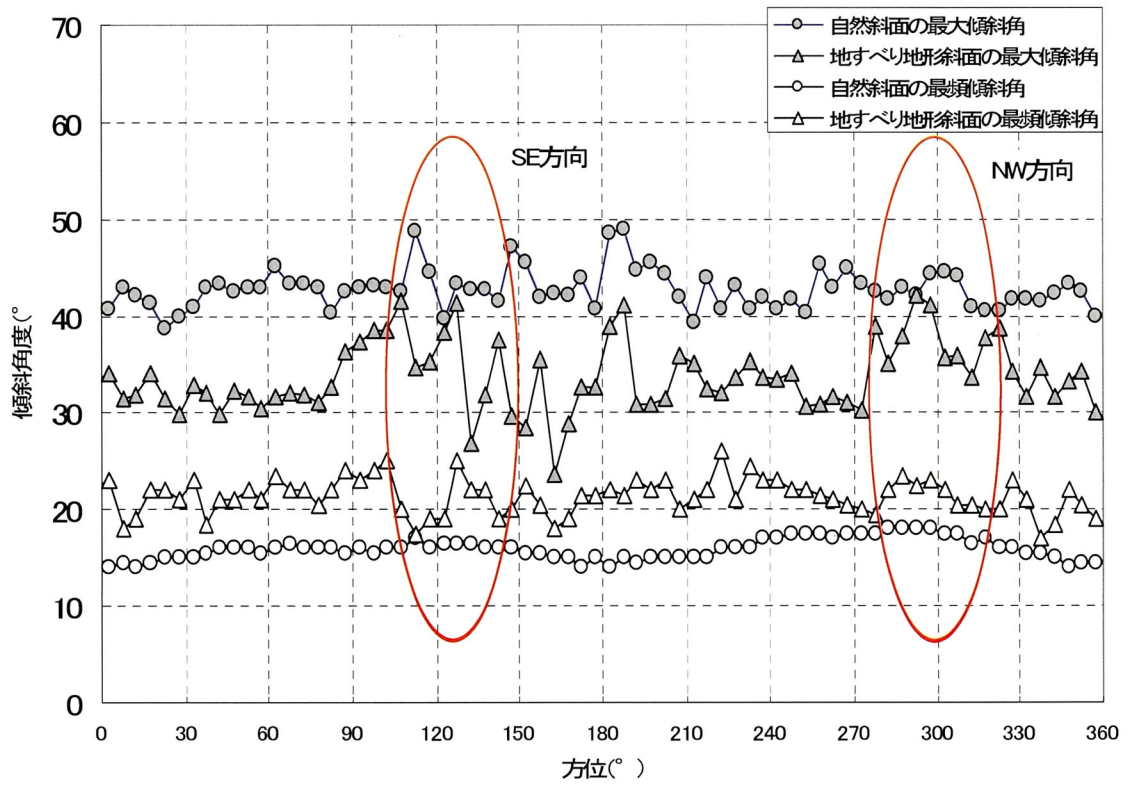


図 4.9 自然斜面と地すべり地形斜面の傾斜方位と傾斜角

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

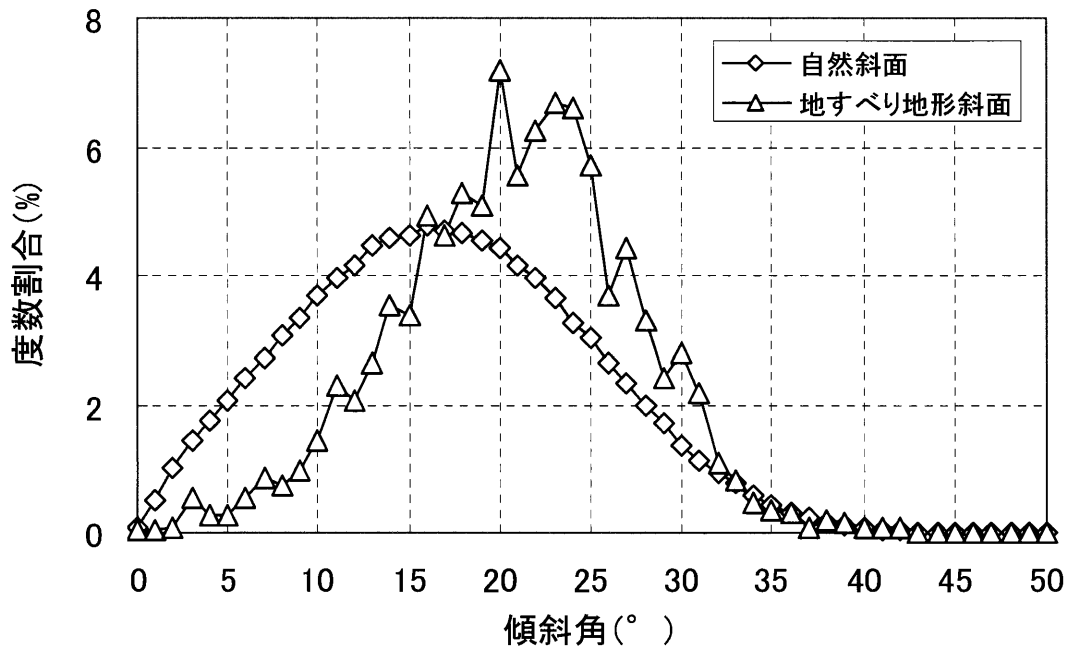


図 4.10 自然斜面と地すべり地形斜面の最頻傾斜角

4.3 地すべり地形斜面の最頻傾斜角と地すべり面強度との相関

山本ら⁴⁾⁻⁷⁾は、山口県下の三郡変成岩類分布域において主に切り取り斜面で、特に集中豪雨によって発生した多くの崩壊・地すべりに対し、採取試料のせん断強度試験(一面せん断試験)を実施している。その対象としている崩壊・地すべりは幅が数 10 m 程度の小規模なものであり、地すべり粘土が形成されているような大変位を生じた地すべりは対象としていない。表 4.3 に試験結果の一覧を示す。試験に供した風化土試料はほとんどが再構成試料であり、また不攪乱試料であってもそれは指圧で容易に押し潰せる程に土砂化しており、片理構造を無視できるものである。表には参考として軟岩試料の結果も併記しているが、これらは片理構造を有する試料であり、それぞれ片理面に対して水平方向にせん断されたものである。図 4.11 に試験結果を整理した σ_n' - τ 関係図を示す。風化土の水浸試料の強度定数は、不攪乱試料ではわずかに粘着力 c' が表れるもののほぼゼロと見なせ、せん断抵抗角 ϕ' は 23.5° から 28.7° の狭い範囲内にあつて、おおよそ 25° 前後と見なせる。これよりせん断抵抗角は前述した地すべり地形斜面の最頻傾斜角 ($20\sim 25^\circ$) よりも数度大きいものの非常に近い値を示すことがわかる。DEM 地形解析によって求められる地形指標は用いる DEM のメッシュ間隔によって変化する。たとえば、より細かなメッシュ間隔の DEM を用いれば、より詳細な地形の起伏が捉えられ傾斜角が大きくなる。そのため対象とした崩壊・地すべりの規模と同程度のメッシュ間隔の DEM、すなわち 20 m 規模の崩壊・地すべりであれば 20 m メッシュの DEM を用いて地形解析を行えば両者の値はより近いものになると考えられる。

以上のことから、地すべり地形斜面の最頻傾斜角は土試料のせん断抵抗角とほぼ等しく、地すべり面のせん断抵抗角はこれを参考にして合理的に設定できることが明らかである。

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

表 4.3 斜面崩壊地試料における一面せん断試験による強度定数(水浸試料)

試料	崩壊規模幅(m)	粘着力 c' (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ' (°)	岩相	試料	
風化土	A ³⁾	60	0.0	23.6	泥質片岩	再構成
	B ³⁾	60	0.0	24.8	泥質片岩	再構成
	C ⁴⁾	30	4.8	28.7	泥質片岩	不攪乱
	D ⁵⁾	20	0.0	23.5	泥質片岩	再構成
	E ⁶⁾	25	0.0	27.8	塩基性片岩	再構成
軟岩	F ⁶⁾	25	0.0	29.1	塩基性片岩	不攪乱
	G ⁷⁾	25	3.5	36.2	泥質片岩	不攪乱

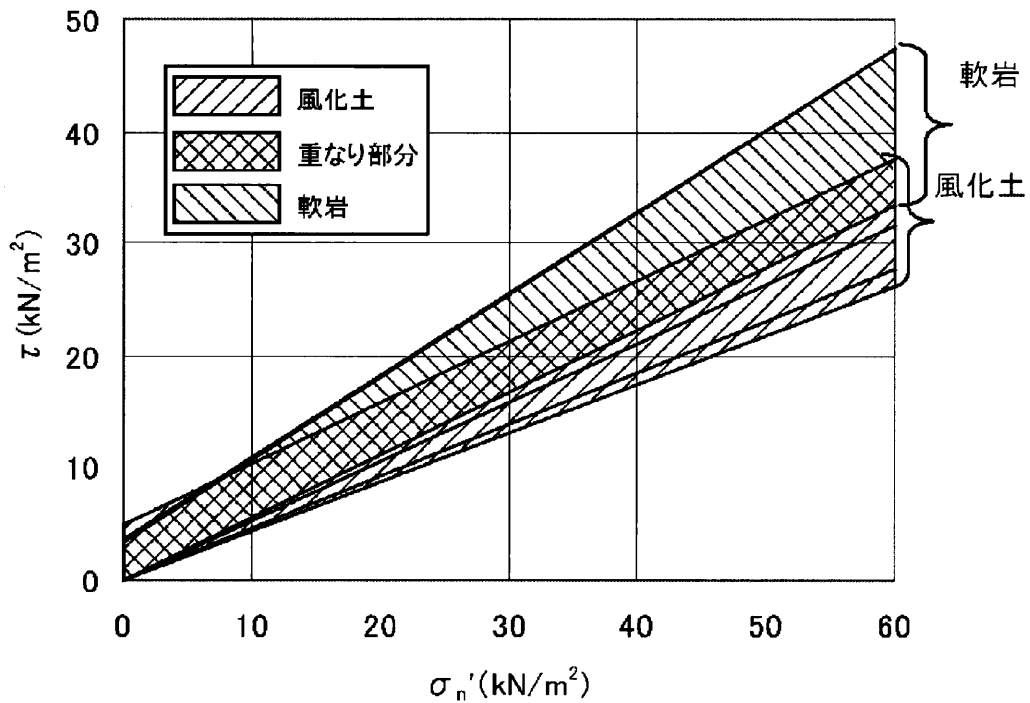


図 4.11 試験結果の $\sigma'_n - \tau$ 関係図

第4章 山口県下の三郡変成岩類地帯における地すべり地形斜面の最頻傾斜角の特性と地すべり面強度との相関

参考文献

- 1) 山口県：山口県地質図「津田」, 「大竹」, 「津和野」, 「鹿野」, 「徳山」, 「光」, 「長門峡」, 「防府」, 「野島」, 「山口」, 「小郡」, 「宇部東部」, 「厚狭」, 「宇部」, 1968.
- 2) 中国地方土木地質図編纂委員会編集, 中国地方土木地質図解説書, pp.93-96, 1984.
- 3) 山本哲朗, 鈴木素之, 松本 直, 国広清己: 花崗岩の貫入を受けた三郡変成岩からなる切土斜面の崩壊, 土と基礎, Vol.47, No.4, pp.27-29, 1999.
- 4) 山本哲朗, 鈴木素之, 国広清己, 原田 博: 三郡変成岩切土斜面の複合すべりについて, 土と基礎, Vol.48, No.11, pp.21-23, 2000.
- 5) 山本哲朗, 北村晴夫, 市川博之, 寺山 崇, 勝部安昭: 三郡変成岩で発生した切土斜面の表層すべり, 土と基礎, Vol.51, No.4, pp.17-19, 2003.
- 6) 山本哲朗, 大原資生, 西村祐二郎, 瀬原洋一: 山口県下の三郡変成岩からなる切土斜面に見られる豪雨崩壊の特徴, 地盤工学会論文報告集, Vol.36, No.1, pp.123-132, 1996.
- 7) 山本哲朗, 鈴木素之, 宮内俊彦, 植野泰史: 三郡変成岩からなる切土斜面の豪雨時崩壊, 土と基礎, Vol.47, No.8, pp.29-31, 1999.

第5章 強風化花崗岩地帯および第三紀層地帯における自然斜面の限界傾斜角の特性とその工学的活用

第3章と第4章では地すべり地形斜面の最頻傾斜角に着目した地形解析を行った。地すべり地形斜面の最頻傾斜角は地すべり面のせん断抵抗角と対比できる、地山における最も弱い強度を表す地形指標であると言える。本章ではそれとは逆に、地山における最も強い強度を表す地形指標として、自然斜面の限界傾斜角に着目した地形解析を行う。

急峻な山体を形成する地山の強度は、緩やかな山体のそれに比べて大きいと予測できるように、自然斜面の傾斜角は地山の強度を反映している。自然斜面の傾斜角は地質条件や気候条件により異なり、例えば花崗岩地帯と火山岩地帯と第三紀層地帯とでは、また、多雨地帯や寒冷地帯とそうでない地帯とではそれぞれ異なるはずである¹⁾。すなわち、自然斜面の傾斜角はその地層が置かれた地域性を考慮に入れた特有の地形指標であると考えられる。その特徴を最も端的に表す指標が自然斜面の傾斜角のうち最も急な斜面の傾斜角である限界傾斜角であり、それは概念的には土砂地山における安息角と対比できるものである。

5.1 限界傾斜角の定義

自然斜面の傾斜角の頻度分布は、既往の研究も含め、これまでに示した斜面傾斜角の頻度分布図に見られるとおり、いずれにおいても最頻値を超えてより値の大きい側では指数関数的に頻度が減少している。そして、ある傾斜角で頻度がゼロとなる。土志田ら(2007)²⁾が泥火山を対象とした地形解析により、泥火山には斜面の安定に対してある種の限界角があることを指摘しているように、土砂地山の自然斜面には傾斜角の限界、すなわち限界傾斜角があると考えられる。

本解析では、限界傾斜角は、頻度が最頻値を超えて減少する区間に対し、最も高い相関性を示す指数関数で頻度を整理し、そのときの頻度が1となる傾斜角と定義付けた。すなわち、限界傾斜角は頻度が1となる傾斜角を外挿することにより求めた。それは計測するメッシュの大きさにおいて自然斜面がつくり得る最も急な斜面の傾斜角を意味しておいた。図5.1に限界傾斜角の決定法を模式的に示す。

頻度を f , 傾斜角を ϕ として, データを f - ϕ 関係図に整理する(図5.1の上図). 続いて, f に x 乗して $f^x = \phi$ の関係を求め, $\phi > \phi_{peak}$ において次の式で直線近似する(図5.1の下図).

$$f^x = a\phi + b$$

ここで, a は傾き, b は切片である. この式において頻度が1となるときの ϕ を限界傾斜角 ϕ_{lim} として求めると, ϕ_{cri} は,

$$\phi_{cri} = (1-b)/a$$

で与えられる.

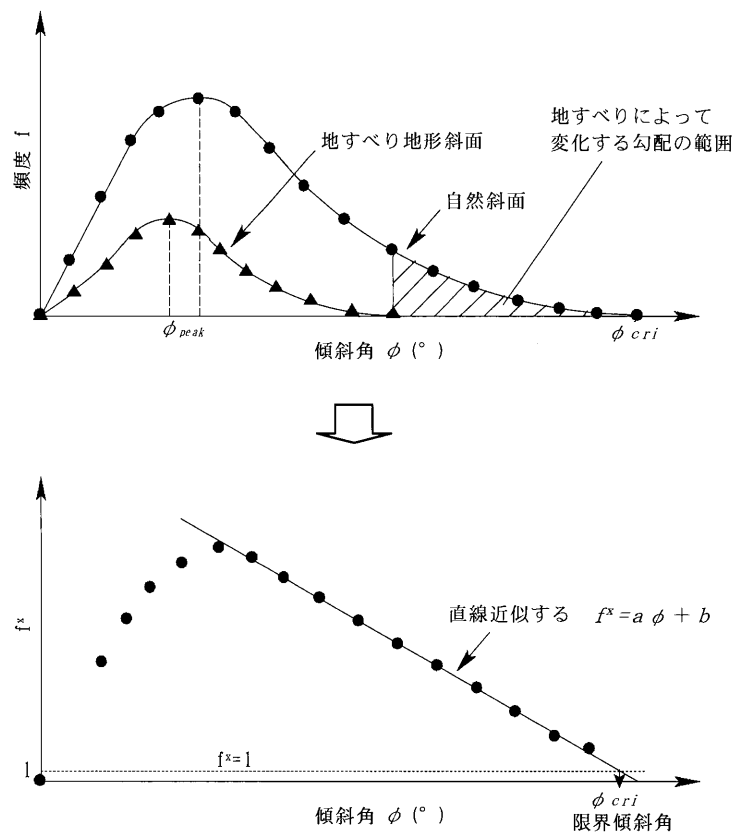


図5.1 限界傾斜角の決定法(模式図)

5.2 深層風化した花崗岩地帯における解析

島根県南東部の中国山地に分布する花崗岩地帯を対象として事例検討を行った。この花崗岩地帯は深層風化を被って一様にマサ化しており、岩盤の不均質性が少ない軟岩地帯とみなせることから地形解析を行うには好条件である。その範囲は5万分の1地質図幅の「横田」、「多里」、「木次」、「頓原」の範囲にあたる。地質データの取得は、「横田」、「多里」、「木次」では各地質図幅^{3) 5)}を用いたが、「頓原」については地質図幅が未発行であるため土地分類調査の表層地質図⁶⁾を用いた。

5.2.1 対象域の概要

対象域は、南に中国山地を背にして広島県と接する島根県奥出雲町(旧横田町と仁多町)に分布する花崗岩地帯である。島根県奥出雲町は、町の面積約370 km²の大部分に白亜紀後期から古第三紀にかけて遡入した因美期の花崗岩類が分布し、これが準平原化した際に深層風化を被り、一帯には高原状の山地が広がっている(図5.2)⁷⁾。この地方の花崗岩には良質の磁鉄鉱が含まれることから、マサ土を水に流して比重選鉱する「かなな流し」と呼ばれる砂鉄の採取が過去盛んに行われており、その跡地が横田を中心に無数に分布しているように、一帯の花崗岩類は総じてマサ化している。切土面等に見られる露頭はすべてマサであって、浸食の盛んな河床周辺以外に未風化岩盤をみることはない⁸⁾。

花崗岩類は石英分を多く含む粗粒の花崗斑岩から斜長石を多く含む細粒の花崗閃緑岩まで岩相がわかれ、それぞれの岩体がNE-SWないしENE-WSW方向に伸びた帯状に分布する(図5.3)。南縁の中国山地沿いには火山岩が分布し、また花崗岩類中にも所々に貫入岩が分布するが、それらを除外してメッシュ数の百分率から岩相別の面積割合を求めると、大きい方から、花崗岩58.9%、花崗閃緑岩30.0%、花崗斑岩11.1%である。

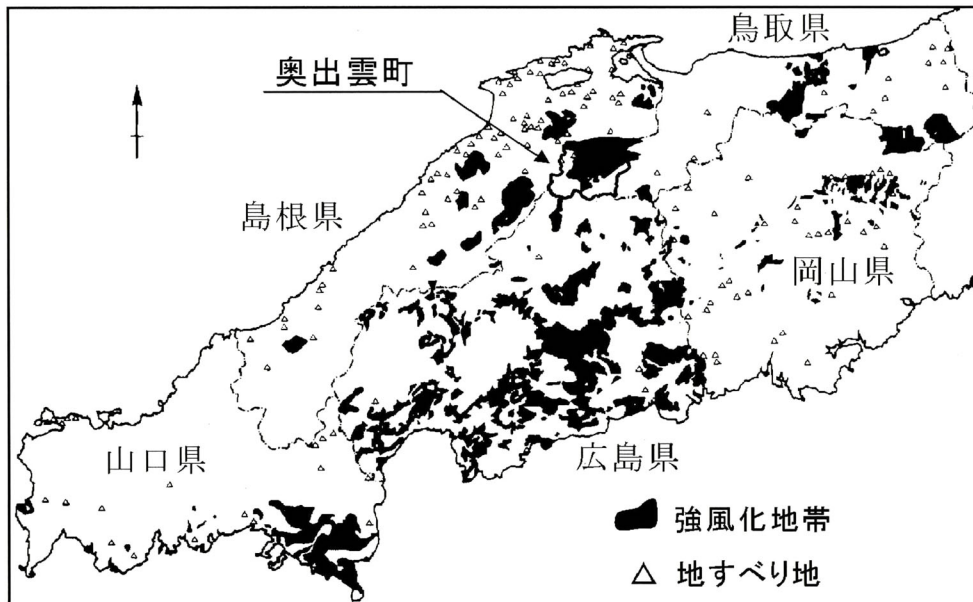


図5.2 中国地方の強風化地帯⁷⁾(文献7)の図面に加筆)

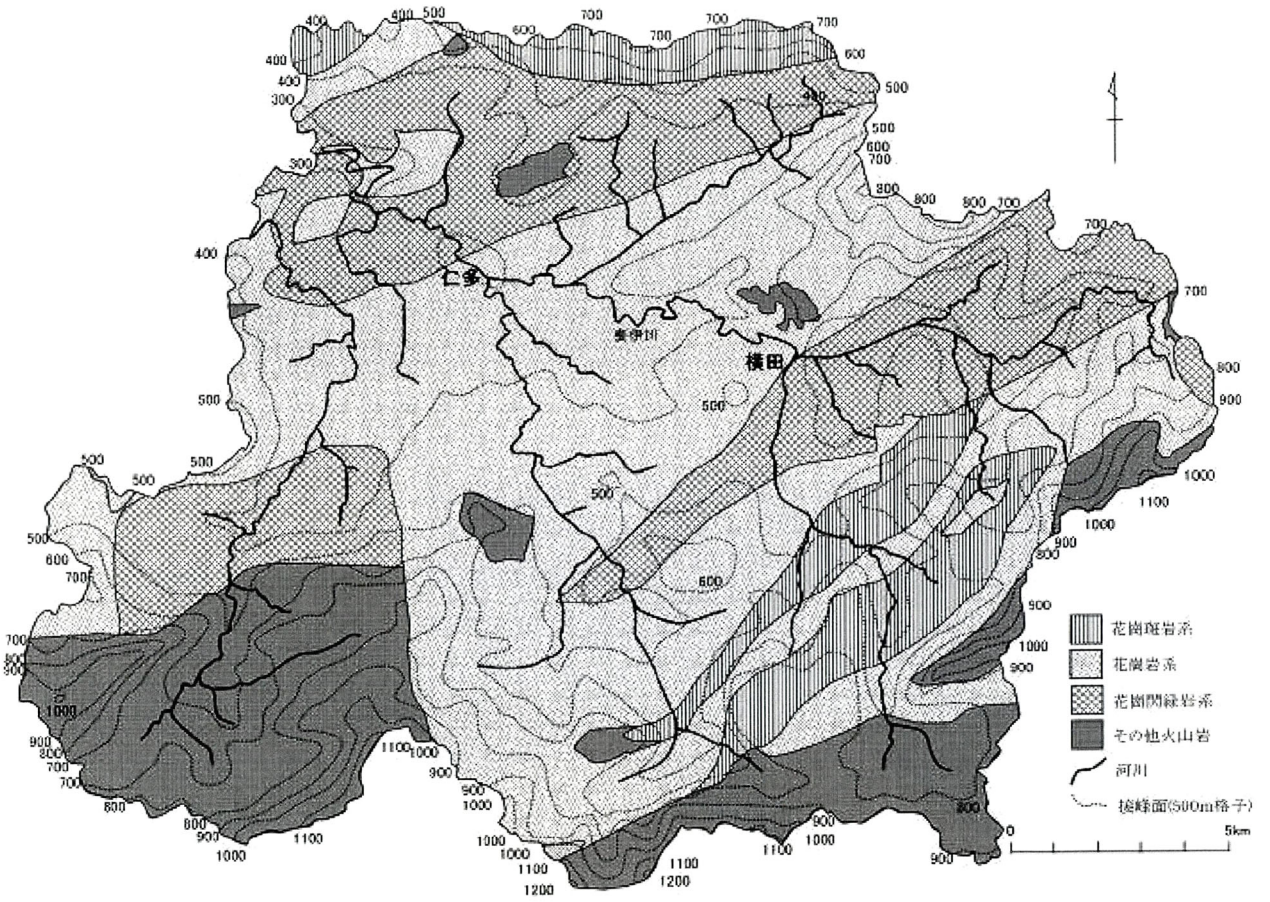


図 5.3 奥出雲町における花崗岩類の分布



写真5.1 奥出雲町の花崗岩地帯の地形



写真5.2 深層風化した花崗岩



写真5.3 マサ化した花崗岩

5.2.2 解析結果

1) 地形の特徴

図5.4は斜面の傾斜角と傾斜方位を散布図上に表したものである。円の中心が傾斜角 0° 、外周が傾斜角 50° を表す。同心円は 10° 刻みであり、北東(NE)方向に傾斜する斜面はNとEの間(第1象限)にプロットされる。これにより自然斜面の傾斜角は傾斜方位による偏りを示さないことが確認できる。

図5.5は自然斜面の傾斜角の頻度分布図を岩相別に示したものである。頻度分布は、花崗斑岩では 18° を最頻値としてほぼ正規分布をなすが、花崗岩では 13° 付近を最頻値としてそれよりも値の大きい側に裾の広がった非対称な分布をなし、花崗閃緑岩では 8° 前後を最頻値としてより非対称な分布をなし、同じ花崗岩類であっても岩相の違いにより地形の状況がかなり異なる。それは各岩相の鉱物組成の違いを反映しており、花崗斑岩は石英粒子に富み、それによる粒子間のかみ合わせによってもたらされる摩擦力が発揮され相対的に急な斜面をつくるが、花崗閃緑岩は斜長石が風化しやすいため粘土化が進んで浸食を受けやすく、花崗岩はこれら両者の中間の地形を呈することに原因すると考えられる。

対象域には77箇所にて地すべり地形が分布するが、それらは最大のもので幅が約200 m、平均すると幅が約100 mであり、データ取得に用いた地すべり地形分布図に示されるもののなかでは最小規模のものである(写真5.2)。地すべり地形の面積割合をメッシュ数の百分率から求めると花崗斑岩が0.67%、花崗岩が0.42%、花崗閃緑岩が0.34%といずれも極めて小さい。それでも地すべり地形の分布は花崗斑岩に多く花崗閃緑岩に少ない傾向が窺われる。図5.5には地すべり地形斜面における傾斜角の頻度分布を併記している。

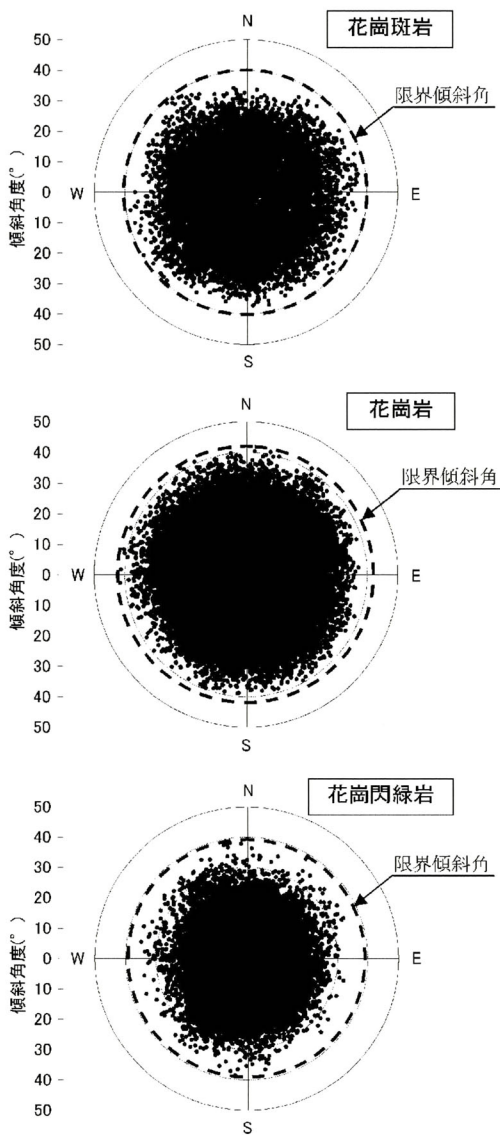


図 5.4 斜面の傾斜角と傾斜方位を示す散布図

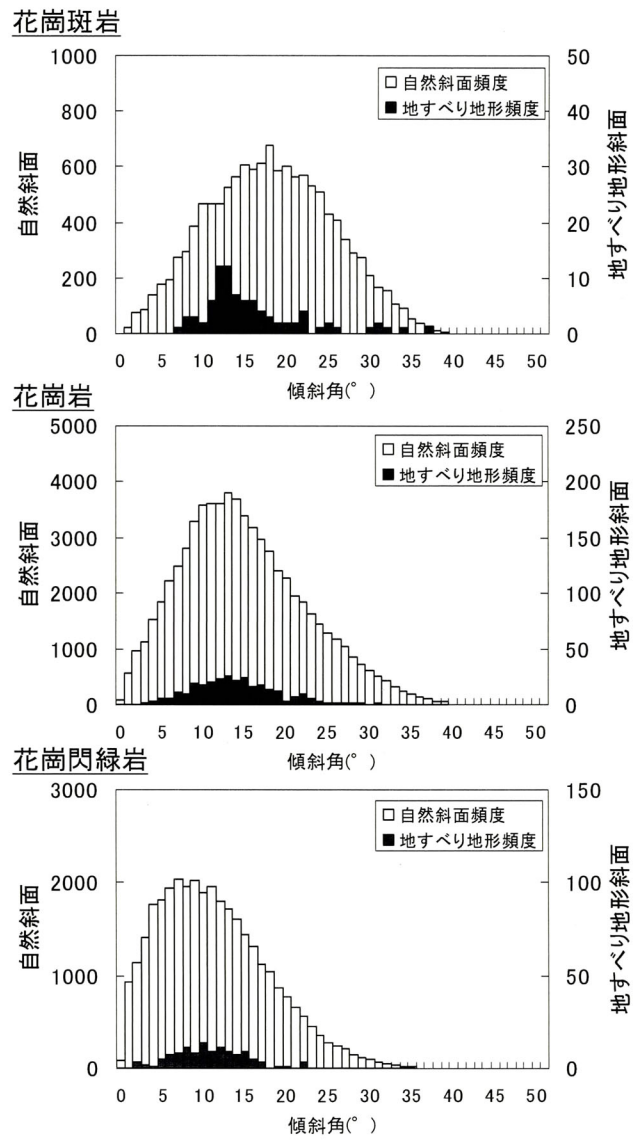


図 5.5 マサ土地帯における斜面の傾斜角頻度分布

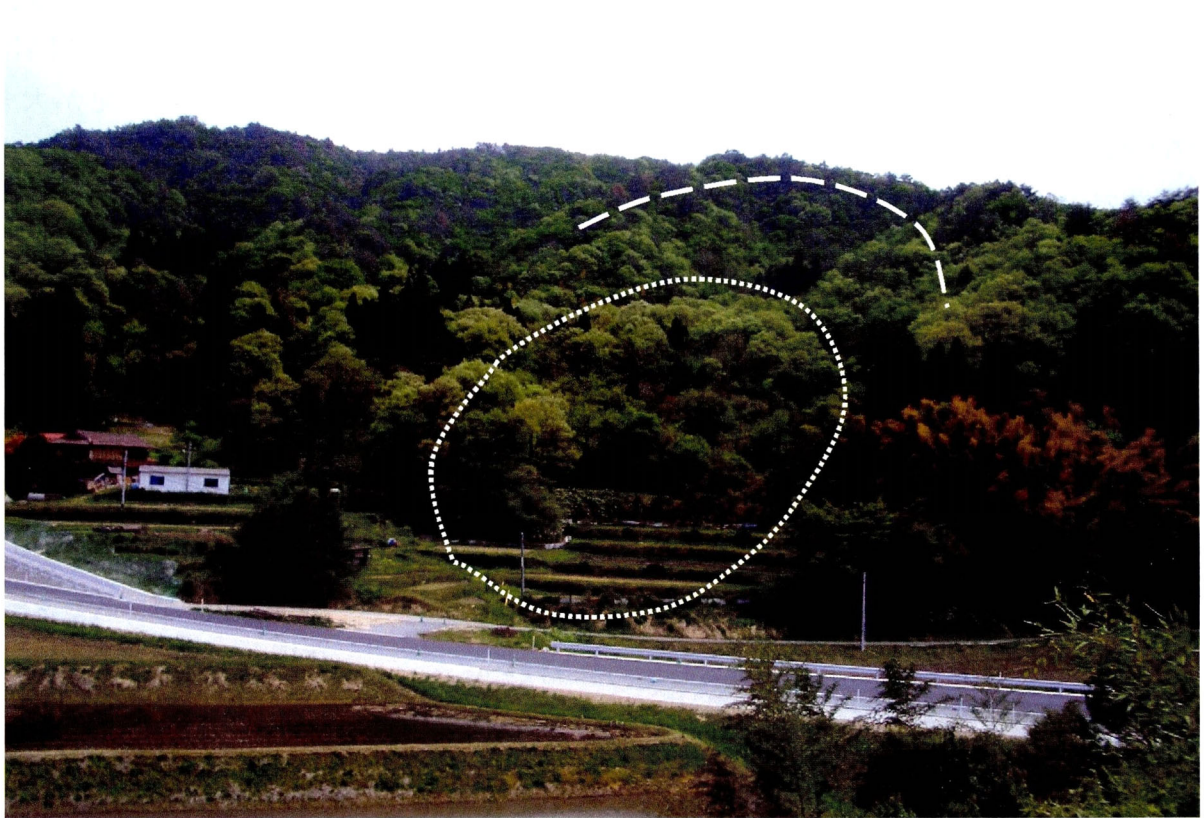


写真 5.4 花崗斑岩の地すべり斜面
(幅 110 m ,長さ 460 m,平均傾斜角 15°)

2) 限界傾斜角の算定

図5.6は先に示した方法により花崗岩類の各岩相について限界傾斜角を算定した整理図である。直線近似区間の相関係数はいずれも0.995以上ある。

花崗岩類の限界傾斜角は表5.1に示すとおり、いずれも 40° 前後であって、数度の違いがあるに過ぎない。しかし、それが岩盤の工学的性質の違いを反映していると考えられ、花崗斑岩は相対的に急な斜面をつくるものの、その限界傾斜角は花崗岩に比べて 2° 程度小さく、花崗斑岩のマサは粘土分の含有が少ないことから勾配が大きくなると崩れやすい性質があると推察できる。

なお、 40° という値は、本州四国連絡橋公団(現 本州四国連絡高速道路(株))の岩盤分類におけるCL～CM級岩盤の粘着力を無視した場合のせん断抵抗角にほぼ相当する(表5.2⁹⁾)。我が国において花崗岩の岩盤分類と強度定数の関係を整理した公表資料はこの基準が最も詳しく、既刊の設計図書等に示されている基準もこれに基づいている。この基準におけるCL級岩盤は、淡黄褐～黄褐色を呈し、極く脆弱で指でつぶれ、割れ目沿いは粘土化が進行して土砂状で密着しており、ボーリングはメタルクラウン掘削が可能で、コアは細片状で岩片を残し指で碎けて粉状となるものであり、現地の状況と一致する。すなわち、自然斜面の限界傾斜角は、安息角の概念からすれば、土砂地山における強度(せん断抵抗角)を反映した地形指標であると考えられる。

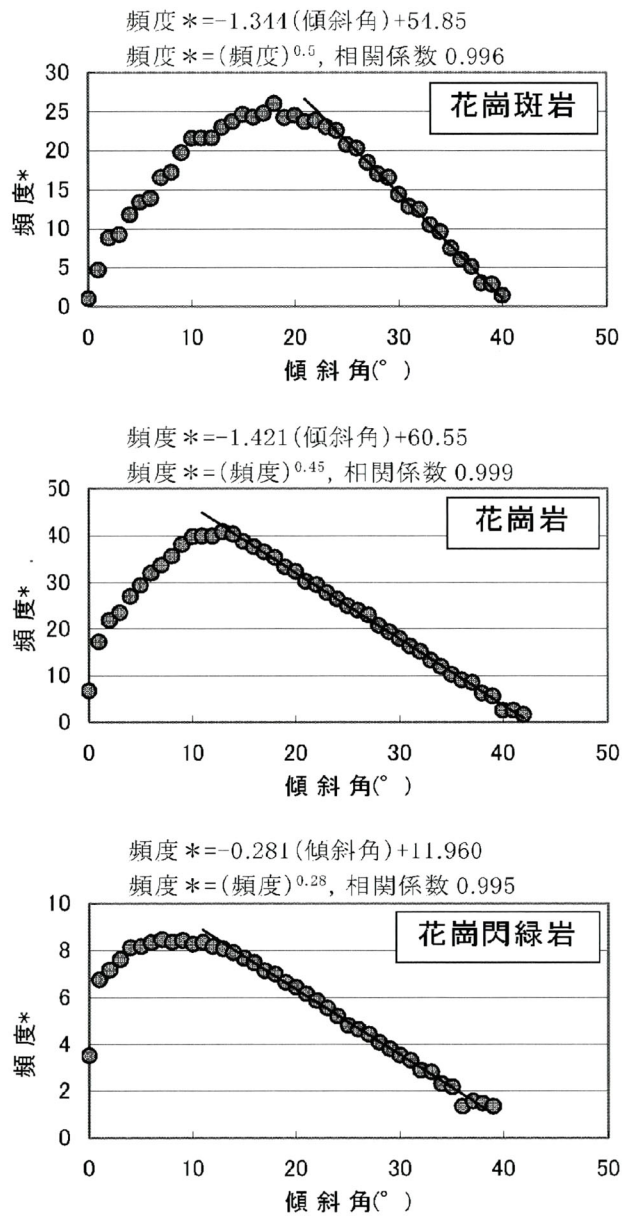


図 5.6 花崗岩類における限界傾斜角の算定

表 5.1 花崗岩類の限界傾斜角

岩種	データ数	限界傾斜角 (°)	直線近似区間の相関係数
花崗斑岩	12,605	40	0.996
花崗岩	66,715	42	0.999
花崗閃緑岩	33,939	39	0.995

表 5.2 本州四国連絡橋公団による花崗岩の強度定数の推定⁹⁾

B 法 (ボーリング孔内測定による推定)

強度区分 表示記号	推定値		代表値	
	c(t/m ²)	φ(°)	c(t/m ²)	φ(°)
A~s	200~300	>50	200	50
B~s	150~250	45~50	150	45
CH~s	150~200	40~50	150	45
CM~s	100~150	>40	100	40
CM' ~s	50~150	40~45	50	40
CL~s	50~100	35~40	50	40
CL' ~s	50~150	35~40	100	35
DH~s	10~50	37~45	10	37
DM~s	1~8	35~42	0	35
DL~s	0~8	30~35	0	30
D' ~s	50~150	30~35	50	30

※) CL, CM 級のダッシュなしは RQD>25%, ダッシュありは RQD<25%

C 法 (肉眼観察による推定)

強度区分 表示記号	推定値		代表値	
	c(t/m ²)	φ(°)	c(t/m ²)	φ(°)
A	150~300	>45	150	45
B	150~250	45~50	150	45
CH	100~200	40~50	100	40
CM	50~150	40~45	50	40
CL	10~100	35~40	10	37
DH	0~50	35~40	0	35
DM	0~8	30~35	0	30
DL	0~8	30~35	0	30

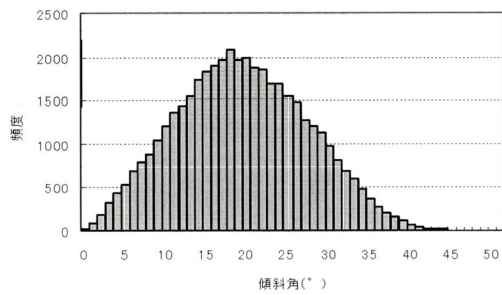
5.3 第三紀層地帯における解析

5.3.1 限界傾斜角の算定

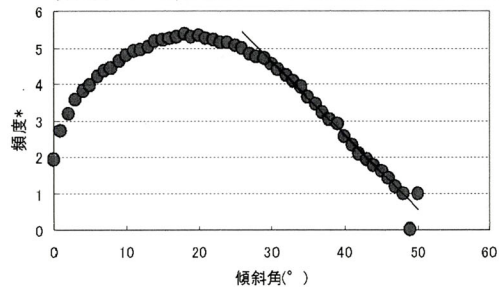
3章に示した第三紀層の地形解析結果にもとづき、各地質の限界傾斜角を算出した整理図を図5.7に示す。直線近似の相関係数は、データ数の多い波多層から大森層までの地層では0.990以上、データ数の少ない布志名層と松江層においても0.938以上である。

第三紀層の限界傾斜角は、表5.3に示すとおり、大きいものから順に、大森層火砕岩、波多層火砕岩、久利層火砕岩、川合層火砕岩、川合層砂岩、久利層泥岩、大森層礫岩、布志名層礫岩、布志名層砂岩、布志名層泥岩、松江層砂岩となっている。大きい方の4つはいずれも火砕岩である。これらの地層では硬質な溶岩や溶結凝灰岩と軟質な凝灰岩が混在しており、特に大森層火砕岩は硬質な安山岩溶岩の分布が多く、傾斜角は硬質な岩盤斜面を計測することにより大きくなっているものと考えられる。一方、それらより限界傾斜角の小さい地層はいずれも堆積性軟岩であり、これらは層序どおりの順となっている。図5.8は、第三紀層の限界傾斜角と地すべり地形斜面の最頻傾斜角を対比したものである。これによると限界傾斜角は各地層で特有の値を示すことがわかる。

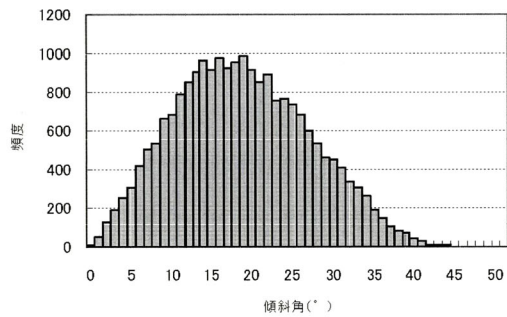
(1) 波多層火砕岩



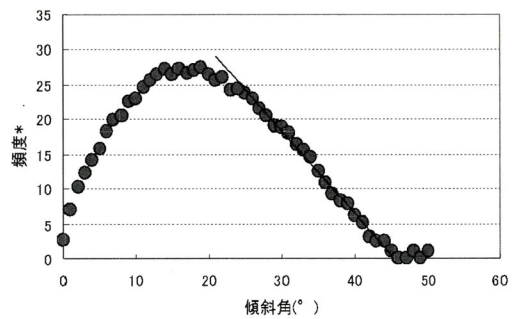
頻度 * = -0.204(傾斜角) + 10.75
 頻度 * = (頻度)^{0.22}, 相関係数 0.997



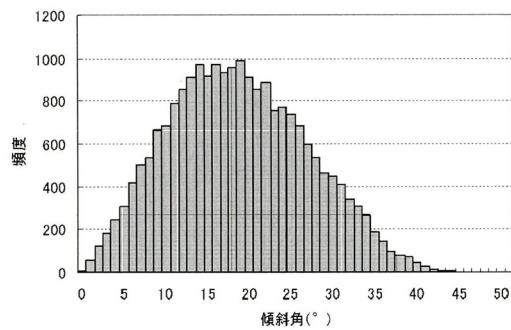
(2) 川合層火砕岩



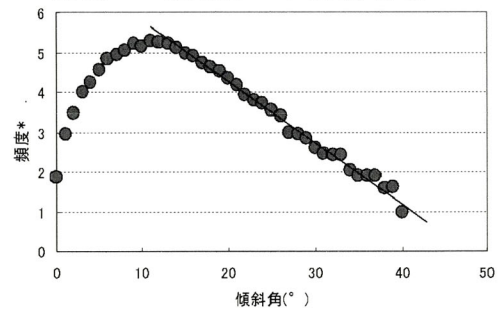
頻度 * = -1.189(傾斜角) + 53.97
 頻度 * = (頻度)^{0.48}, 相関係数 0.994



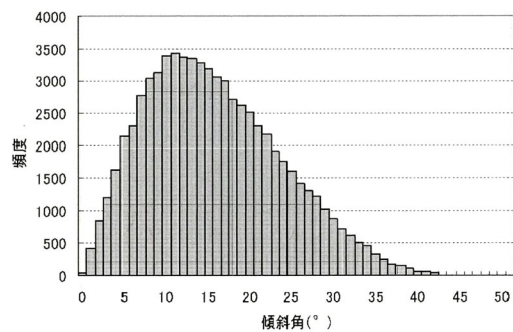
(3) 川合層砂岩



頻度 * = -0.153(傾斜角) + 7.34
 頻度 * = (頻度)^{0.25}, 相関係数 0.990



(4) 久利層火砕岩



頻度 * = -0.959(傾斜角) + 44.45
 頻度 * = (頻度)^{0.41}, 相関係数 0.998

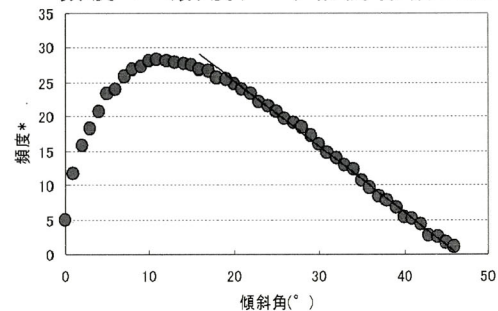
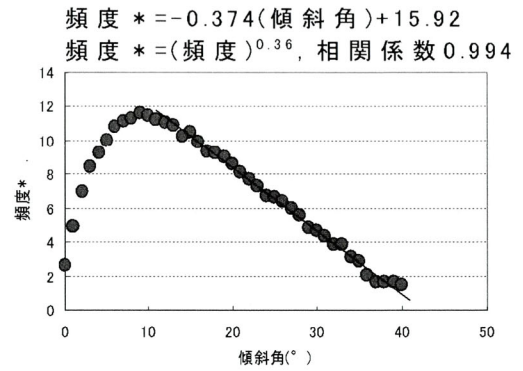
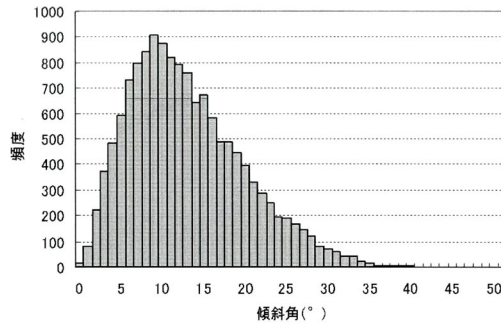
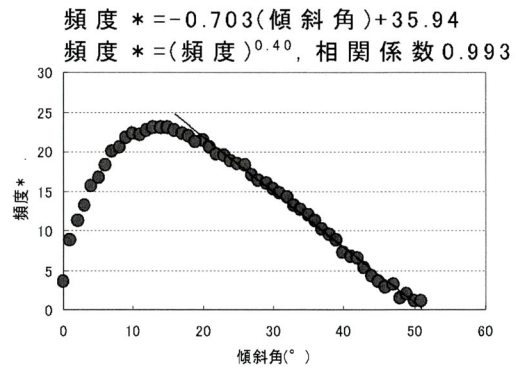
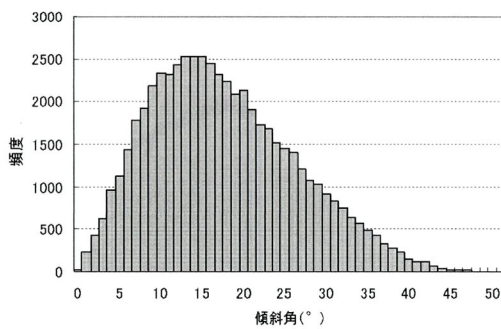


図5.7(1) 第三紀層における限界傾斜角の算定

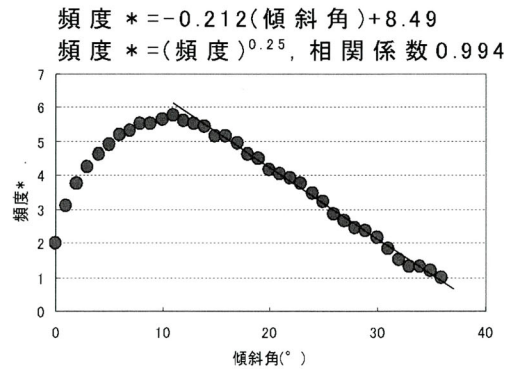
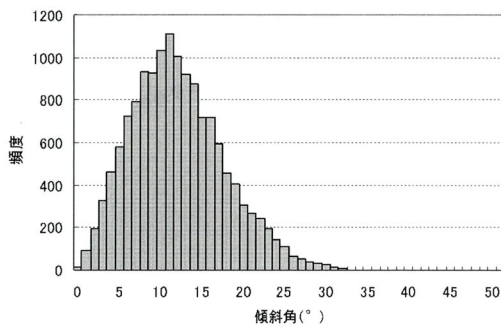
(5) 久利層泥岩



(6) 大森層火砕岩



(7) 大森層礫岩



(8) 布志名層礫岩

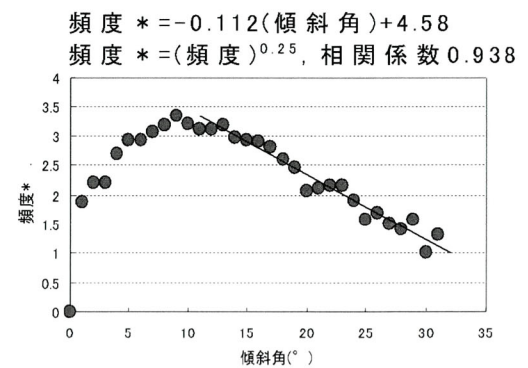
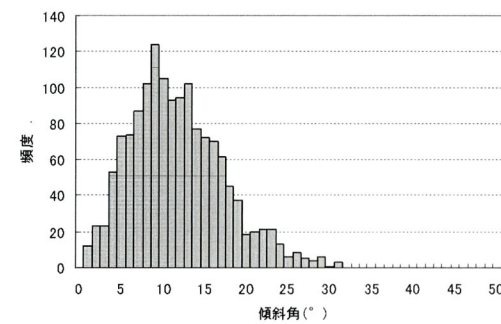
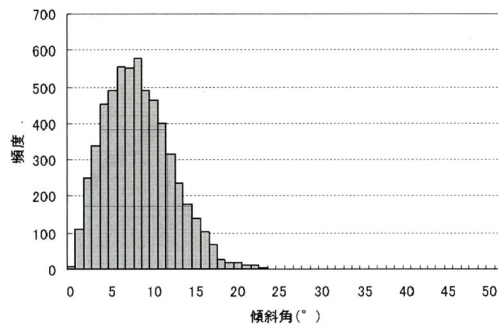
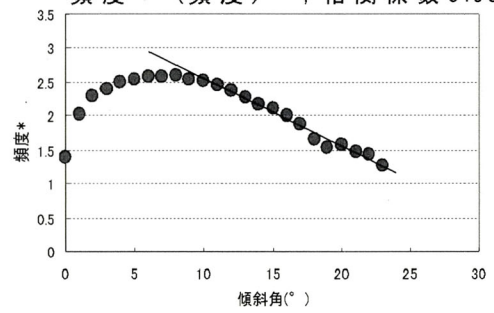


図5.7(2) 第三紀層における限界傾斜角の算定

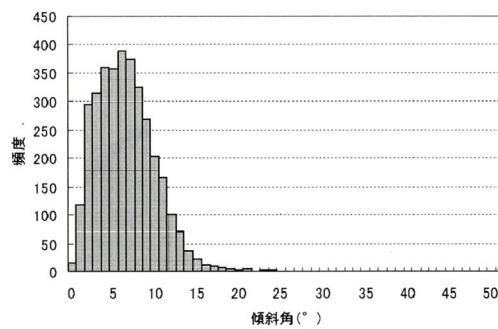
(9) 布志名層砂岩



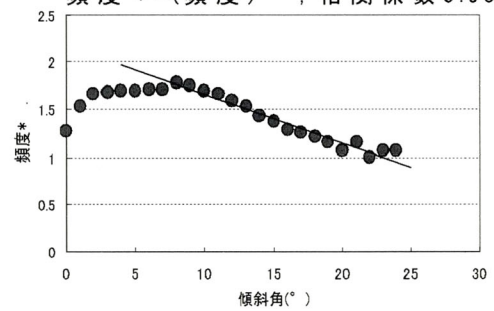
頻度 * = -0.099(傾斜角) + 3.54
 頻度 * = (頻度)^{0.15}, 相関係数 0.983



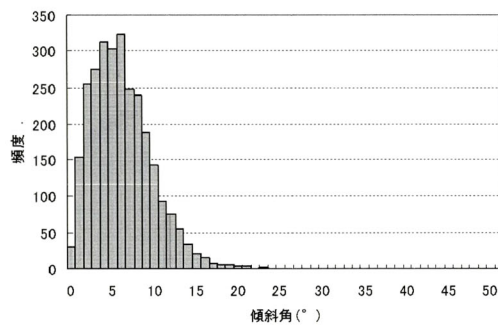
(10) 布志名層泥岩



頻度 * = -0.051(傾斜角) + 2.181
 頻度 * = (頻度)^{0.09}, 相関係数 0.953



(11) 松江層砂岩



頻度 * = -0.045(傾斜角) + 1.998
 頻度 * = (頻度)^{0.09}, 相関係数 0.986

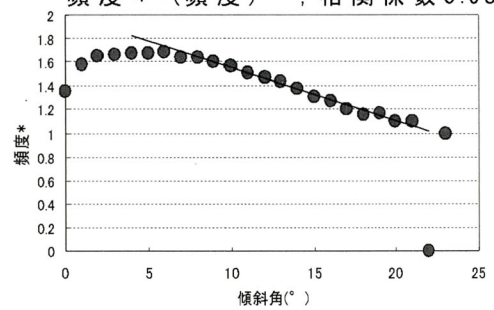


図5.7(3) 第三紀層における限界傾斜角の算定

表 5.3 第三紀層の限界傾斜角

地層名	岩相	データ数	限界傾斜角 (°)	直線近似区間の 相関係数
松江層	砂岩	2,792	22	0.986
布志名層	泥岩	3,462	23	0.953
	砂岩	5,824	26	0.983
	礫岩	1,454	32	0.938
大森層	礫岩	14,389	35	0.994
	火砕岩	55,561	50	0.993
久利層	泥岩	14,088	40	0.994
	火砕岩	70,578	45	0.998
川合層	砂岩	12,140	41	0.990
	火砕岩	21,697	45	0.994
波多層	火砕岩	42,729	48	0.997

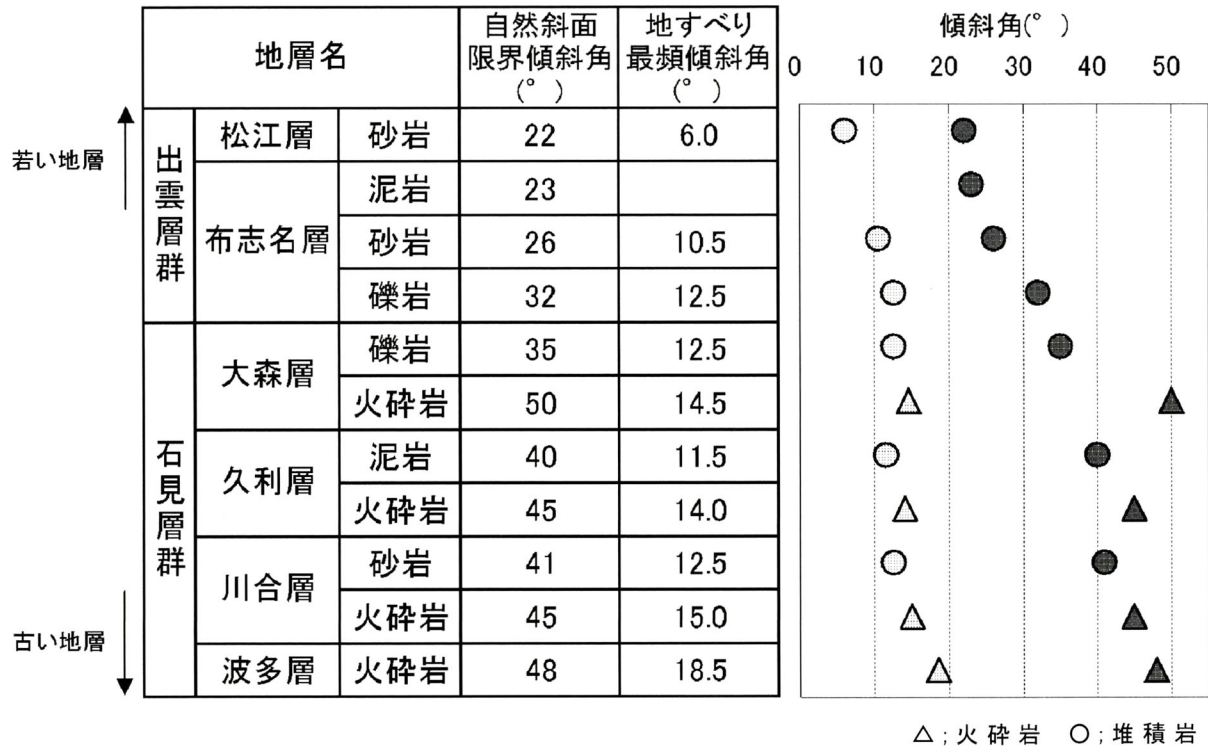


図5.8 自然斜面の限界傾斜角と地すべり地形斜面の最頻傾斜角の関係

5.4 限界傾斜角の工学的活用

限界傾斜角は、地象や気象の自然条件を織り込んだ地形指標であり、それは地層や岩相ごとに特有の値を示し、地山の強度を反映している。その特性を利用すれば、例えば以下のような活用が考えられる。

1) 土木地質図の凡例に併記する

通常、地質図には地質名や岩相のみが凡例に示されている(図5.9)。しかし、この情報だけでは地山の強さをイメージすることはできない。例えば第3章に示した島根県東部の第三紀層地帯に分布する松江層は、地質図では砂岩とされているものの、その実体は岩と呼ぶよりも土砂と呼んだ方がよいような、硬質な部分をまったく残さない岩盤である。

いま仮に、図5.9の両端に矢印で示す沖積谷を通過する道路や鉄道等の線形構造物の敷設を計画することを考えると、地質図の凡例だけではルートは最も効率のよい直線を計画することになる。ところが、その凡例に自然斜面の限界傾斜角や地すべり地形斜面の最頻傾斜角を記載すると、砂岩と凝灰岩を比べれば地山は凝灰岩の方が強く、砂岩は両傾斜角が相当に小さいことから土木地質上問題がありそうなことが推察できるようになり、尾根先端を切土すれば地すべりを誘発する危険がありそうなこと、また砂岩の地山にトンネルを掘削したり大規模な切土を計画するのは得策ではなさそうなことを予測できるようになる。そこで、計画は当初から砂岩での土工を避けて、図5.10に示すようなルートとすることができるようになる。これらの作業はすべて机上で行うことができる。地形指標を示すだけのことではあるが、それが設計に大いに役立つ例である。

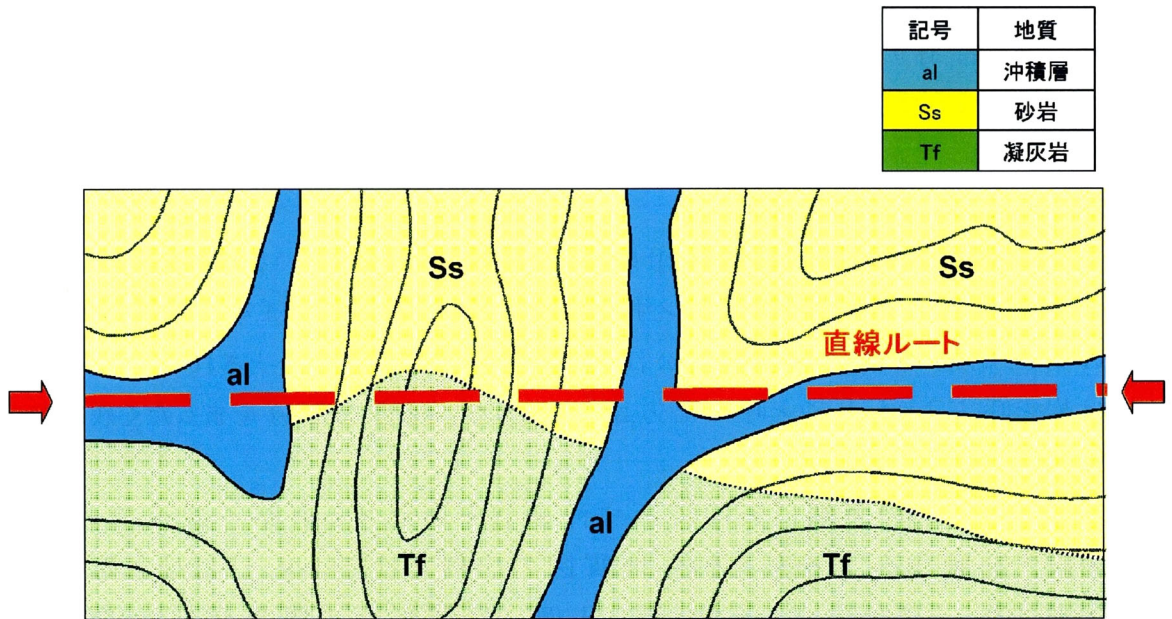


図5.9 地質凡例をもとにしたルート選定

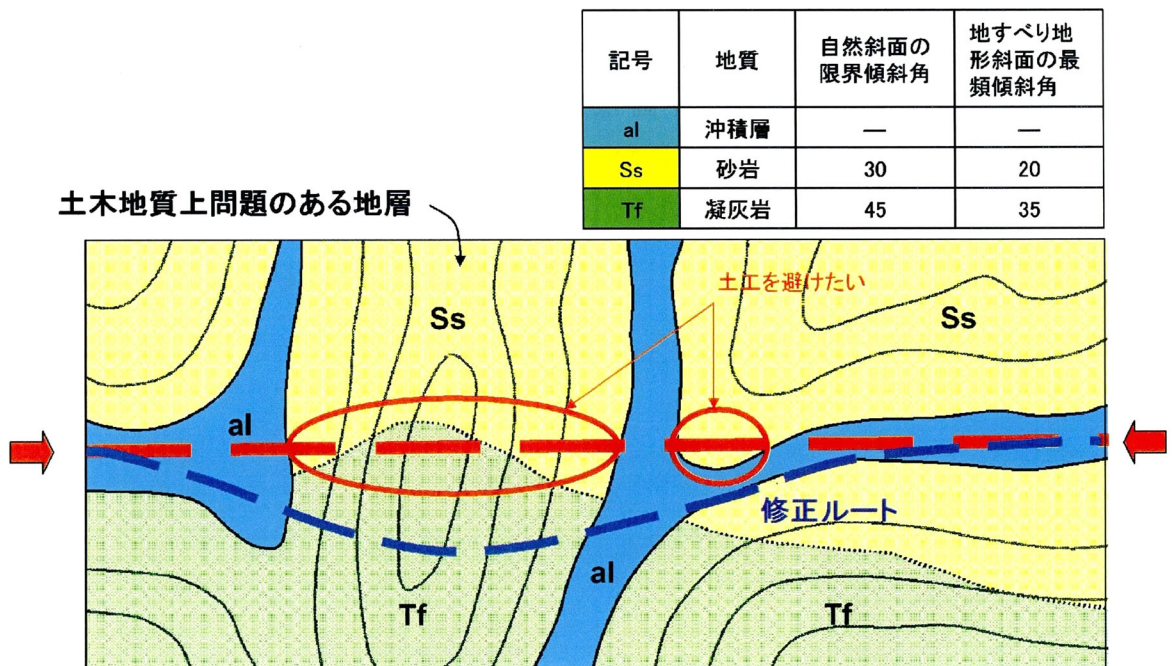


図5.10 地形指標を考慮したルート選定

2) 斜面の不安定ゾーンを抽出する

斜面防災を考える場合，急勾配の斜面が災害に至る危険が高いと考えられる．例えば，図5.11に示す斜面では，地形状況だけを頼りにすれば道路に面する急斜面が不安視されることになる．しかし，これに地質情報を加え，以下のような手順で地形解析を行えば，不安定ゾーンの抽出を合理的に机上で行えるようになる．

- ① 粗いメッシュのDEM(例えば100mメッシュ)により限界傾斜角を求め，これにより斜面の標準的な安定勾配の目安を得る．
- ② 細密なメッシュのDEM(例えば10mメッシュ)により斜面の傾斜角を計測する．
- ③ 安定勾配より急な斜面をその程度に応じてゾーニングする(図5.12)．

ただし，現状では細密DEMを入手しようとするならば航空レーザースキャナー測量を行わなければならない．そのため今後の展開においては，国土地理院による10mDEMの全国整備に期待するところが大きい．



図5.11 地形上不安視される斜面

記号	地質
Ss	砂岩
Tf	凝灰岩

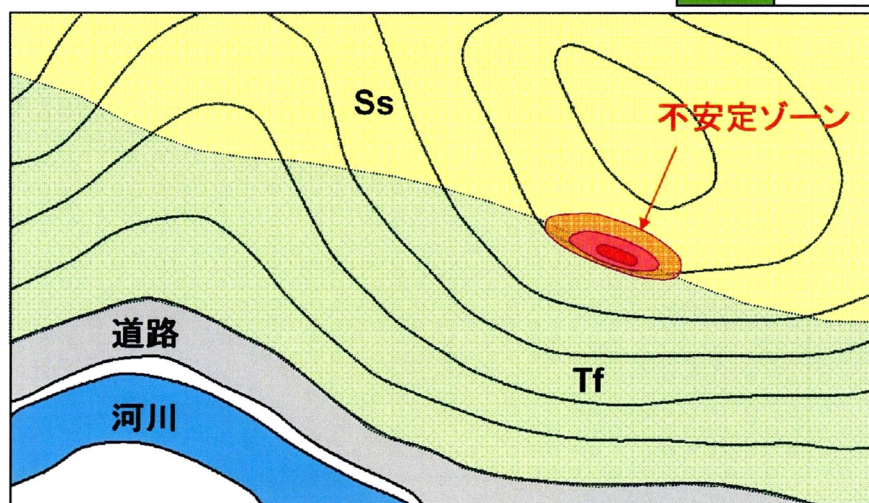


図5.12 地形指標をもとに抽出した不安定ゾーン

参考文献

- 1) 中筋章人:なぜ「土砂災害ハザードマップ」はできないのか, 日本応用地質学会, Vol.46, No.5, pp.250-255, 2005.
- 2) 土志田正二, 千木良雅弘, 中村剛:航空レーザースキャナを用いた地形解析:泥火山山体斜面を例として, 地形, Vol.28, No.1, pp.23-39, 2007.
- 3) 地質調査所:5万分の1地質図幅「横田」, 1973.
- 4) 地質調査所:5万分の1地質図幅「多里」, 1977.
- 5) 産業技術総合研究所:5万分の1地質図幅「木次」, 2005.
- 6) 国土庁土地局:土地分類基本調査図5万分の1表層地質図「頓原・多里」, 1982.
- 7) 日本の地質『中国地方』編集委員会編代表編集委員:猪木幸男, 村上允英, 大久保雅弘:日本の地質7 中国地方, 共立出版, p.209, 1987.
- 8) 田中芳則, 風巻周:花崗岩類分布域における古来のたたら製鉄と斜面崩壊, 応用地質, Vol.46, No.2, pp.89-98, 2005.
- 9) 本州四国連絡橋耐震, 地盤に関する調査研究小委員会:本州四国連絡橋の耐震, 地盤に関する調査研究報告書, p.106, 1980.

第6章 総括

今般、DEMを用いた地形解析が盛んに行われている。しかしながら、自然災害に関する研究では、斜面災害の発生に対する各種地形指標の影響度評価等の研究が主流であり、地形指標の工学的な活用に関する研究は進んでいない。本研究は、地すべり地形斜面の最頻傾斜角と自然斜面の限界傾斜角の二つの地形指標に着目し、土砂地山を対象に幾つかの地層や岩相について行った50 m DEMによる地形解析結果にもとづき、二つの地形指標が示す工学特性を明らかにするとともに、それらの活用について検討を加えたものである。すなわち、地すべり地形斜面の最頻傾斜角は、地層や岩相ごとに特有の値を示し、それは地すべり面のせん断抵抗角とほぼ等しく、地すべり解析における強度定数の設定にあたり有意な地形指標であることを示した。また、自然斜面の限界傾斜角は、地山の強度を反映して地層や岩相ごとに特有の値を示し、それは斜面の不安定ゾーンの抽出等に役立つ地形指標であることを示した。

第1章では、本研究の目的が、地形解析により求められる地すべり地形斜面の最頻傾斜角および自然斜面の限界傾斜角について、それらの特性を明らかにするとともにその工学的活用を図ることにあることを述べた。

第2章では、DEM地形解析の概要を説明し、データの取得方法や、斜面の傾斜角・傾斜方位の求め方を示した。

第3章では、島根県東部の日本海沿岸に分布する第三紀層地帯を対象にした地形解析結果に基づき、地すべり地形斜面の最頻傾斜角の工学特性を明らかにした。すなわち、地すべり地形斜面は地質構造を反映して傾斜方位に偏りがみられるが、その最頻傾斜角の大きさには傾斜方位による違いがほとんどなく、それは地層ごとに特有の値を示し、層序が上位になるに従って小さくなること、また、地すべり地形の分布の多寡と関係する指標であることを示した。

第4章では、山口県下の三郡変成岩類地帯を対象にした地形解析結果に基づき、地すべり地形斜面の最頻傾斜角の強度特性を明らかにした。すなわち、自然斜面は片理構造に規制されてNW-SE方向の斜面が多いが、地すべり地形斜面の最頻傾斜角の大きさには傾斜方位による違いがないこと、また、それは一面せん断試験による風化土水浸試料のせん断抵抗角とほぼ等しく、地すべり面のせん断抵抗角を推定するのに有意な地形指標であることを示した。

第5章では、深層風化した花崗岩地帯を対象とした地形解析結果と、3章に示した第三紀層地帯の地形解析結果に基づき、限界傾斜角の工学特性を明らかにすると

ともに、その工学的活用について検討を加えた。限界傾斜角は計測するメッシュの大きさにおいて自然斜面がつくり得る最も急な斜面の傾斜角を意味し、傾度が1となる傾斜角を外挿して求めると定義付けした。

深層風化した花崗岩地帯における限界傾斜角は、岩相の違い(構成鉱物の違い)を反映して、花崗岩、花崗斑岩、花崗閃緑岩で数度の違いがあるもののほぼ 40° をなし、それは本四公団の岩盤分類におけるCL級岩盤のせん断抵抗角にほぼ相当するものであり、地山のせん断抵抗角と関係する可能性のある地形指標であることを示した。また、第三紀層地帯における限界傾斜角は地層ごとに特徴を示し、火砕岩で大きく、堆積岩では層序どおりの順で上位に向けて小さくなることを示した。そして、限界傾斜角は、土木地質図の凡例に示すだけで地山の強度を推定する目安が得られること、また、斜面の不安定ゾーンを抽出する等に活用できることを示した。

本研究によって地形解析により求められる地形指標のうち、地すべり地形斜面の最頻傾斜角と自然斜面の限界傾斜角の工学的な有意性が明確となった。ただ、DEMを用いた地形解析ではDEMのメッシュ間隔によって得られる結果が異なるため、今後は本研究で用いた50mDEM地形解析結果の汎用性を検証するために適用事例を蓄積する必要があると考えている。

おわりに

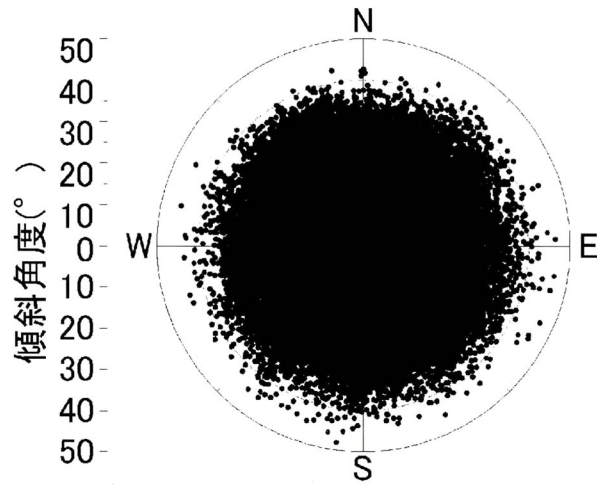
本論文には、筆者が地質技術者として体得した知識を伝えたいという思いを込めている。地すべり斜面对策において安定解析を行う場合、すべり面の強度定数は、すべり層厚より粘着力を推定し逆算によりせん断抵抗角を求めるよりも、地山の地質状況に応じて先ずせん断抵抗角を設定し逆算により粘着力を推定した方が上手くいく場合が多いことを筆者は知っている。それを地すべり地形斜面の最頻傾斜角に関する検討に盛り込んだつもりである。また、道路敷設等に伴い切土計画を行う場合、切土勾配の設定は、周辺の地形を概観し、最も急な安定斜面の勾配を目安として、それよりもやや急な勾配で設定すれば上手くいく場合が多いことを筆者は知っている。それを自然斜面の限界傾斜角に関する検討に盛り込んだつもりである。

本論文をとりまとめるための基礎とした関連論文は、山本哲朗先生の指導によるものである。その山本先生が故人となられたことは残念でならないが、ここに深く感謝の意を表します。また、山本先生の後を引き継いでくださいました進士正人先生と、私の一連の研究に対しきめ細かに助言・指導をくださいました鈴木素之先生に感謝申し上げます。さらに、本論文をまとめるにあたり指導をいただいた清水則一教授、川崎秀明教授、中田幸男教授に感謝申し上げます。一方で、研究を下支えしてくださった大坂伊作氏（イズテック株）、よき理解者であり常に励ましをくださいました潮司氏と岡村真氏（財団法人道路保全技術センター中国支部 前支部長と現支部長）に感謝申し上げます。そして最後に、50歳も近くになって博士課程に挑戦するだけの知力と体力を授けてくれた両親に感謝し、なにより、二人の子供と同時期に大学生となった酔狂な亭主を苦しい家計の中で見守ってくれた、愛する妻に感謝します。

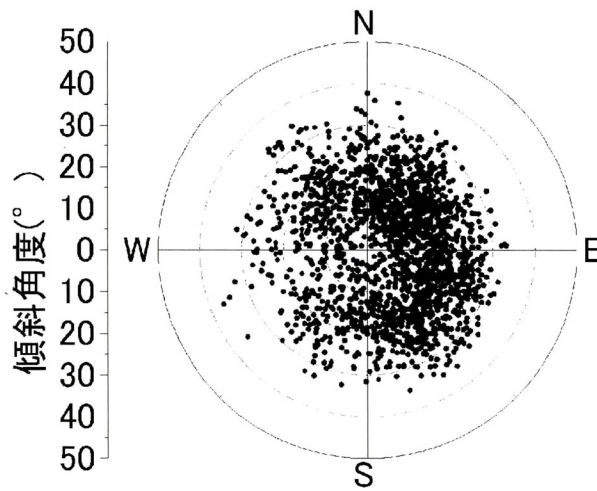
卷末資料

卷末資料

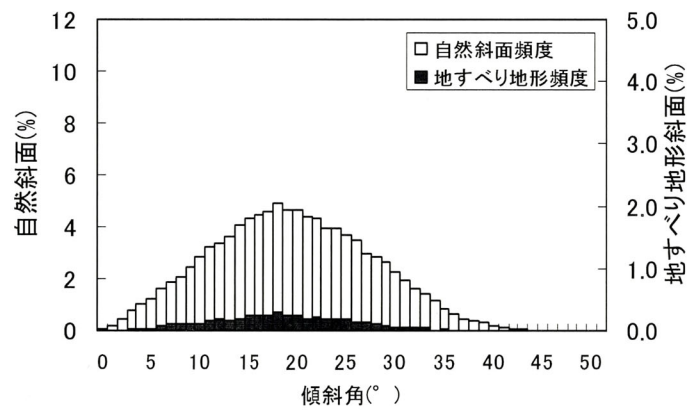
(島根県東部の第三紀層地帯における各層の地形状況)



(a) 自然斜面の傾斜角と傾斜方位

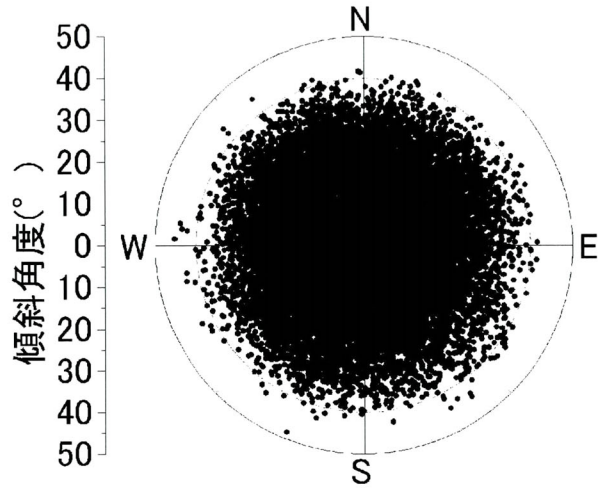


(b) 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位

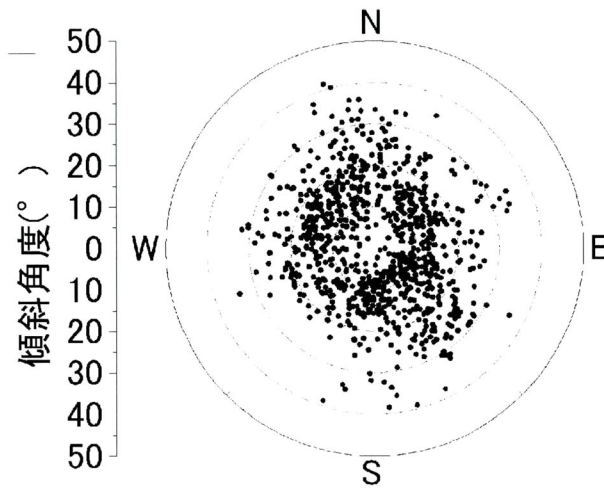


(c) 傾斜角の頻度分布(百分率表示)

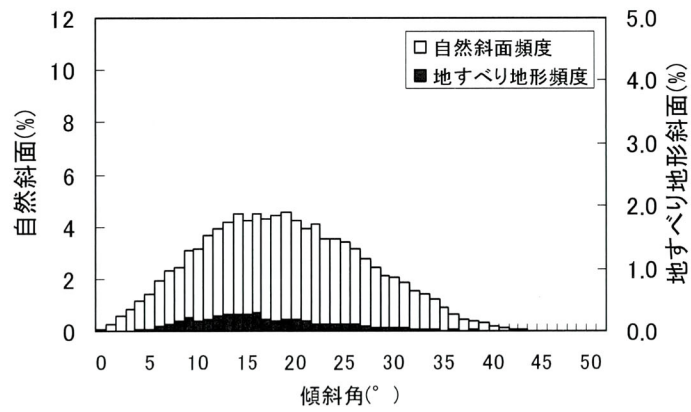
巻末資料



(a) 自然斜面の傾斜角と傾斜方位

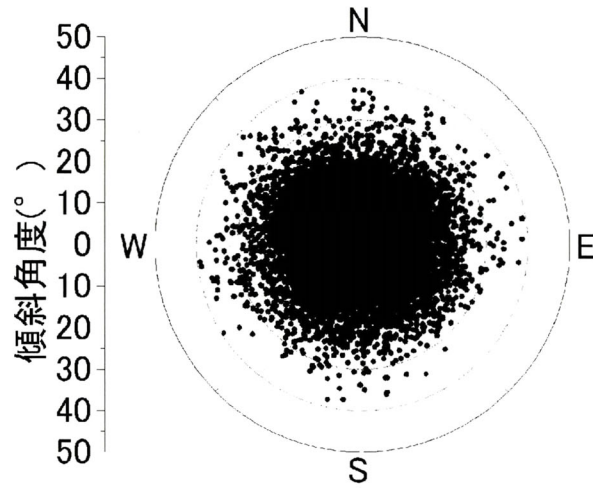


(b) 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位

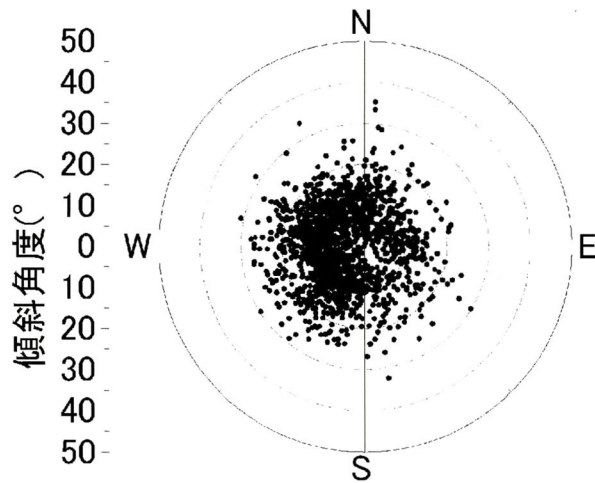


(c) 傾斜角の頻度分布(百分率表示)

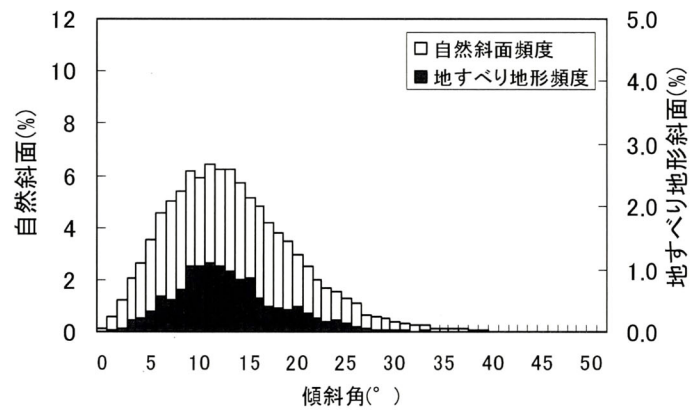
巻末図-2 川合層火砕岩における斜面状況



(a) 自然斜面の傾斜角と傾斜方位

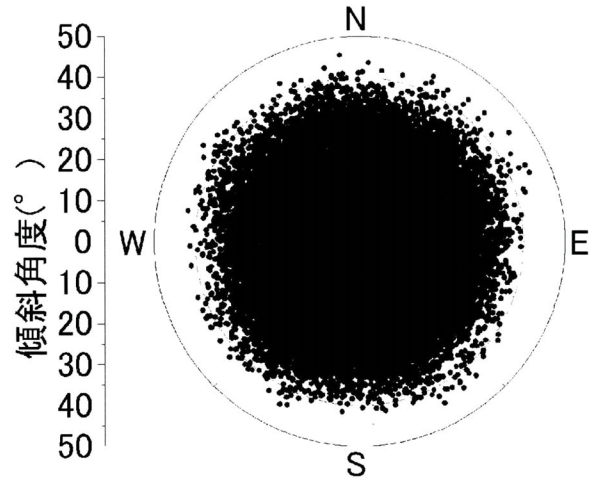


(b) 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位

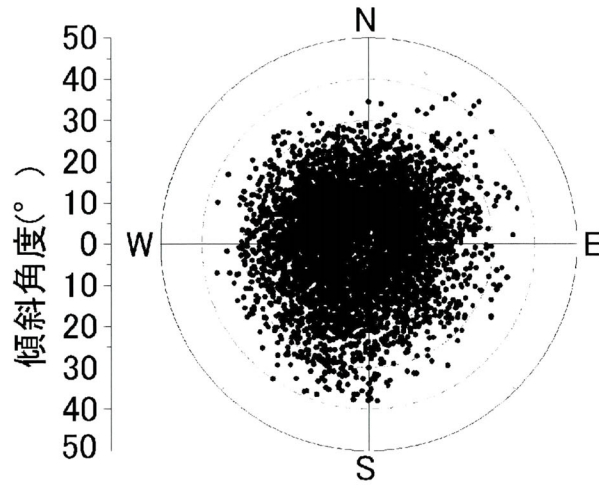


(c) 傾斜角の頻度分布(百分率表示)

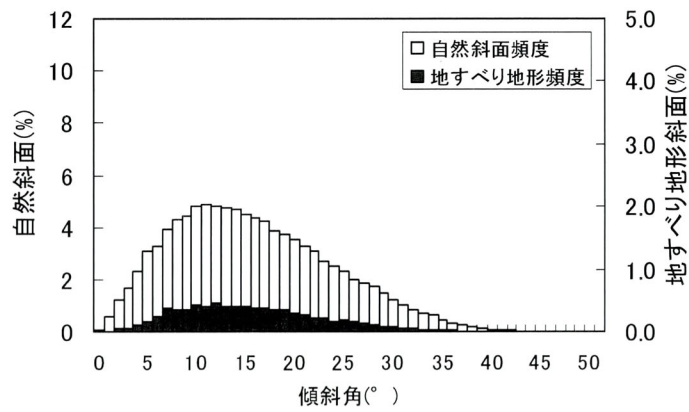
巻末図-3 川合層砂岩における斜面状況



(a) 自然斜面の傾斜角と傾斜方位



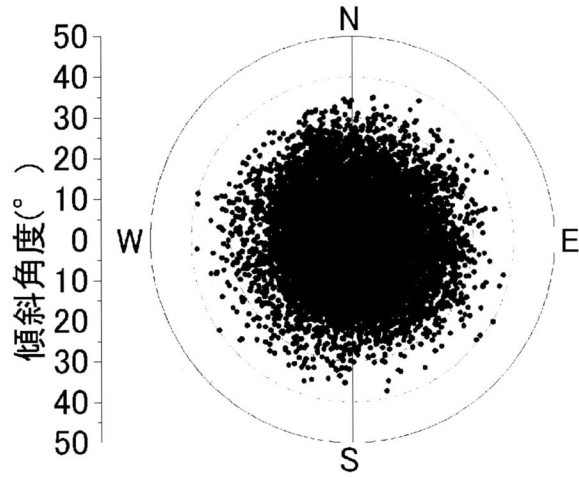
(b) 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位



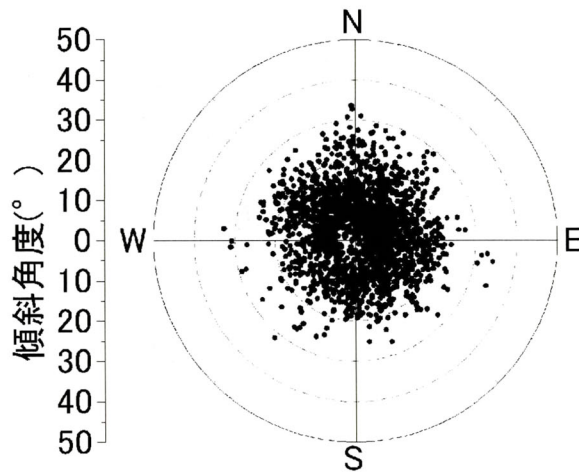
(c) 傾斜角の頻度分布(百分率表示)

巻末図-4 久利層火砕岩における斜面状況

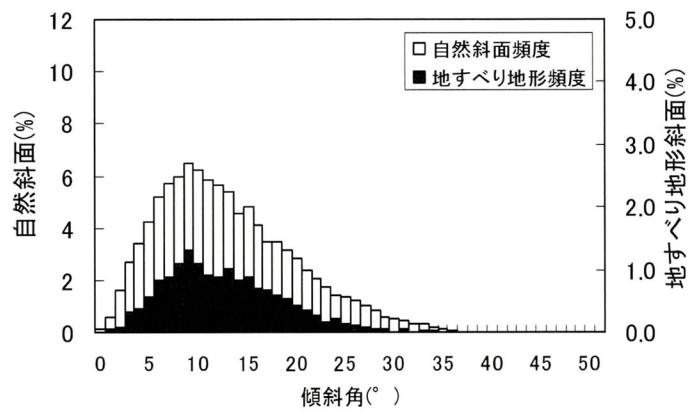
巻末資料



(a) 自然斜面の傾斜角と傾斜方位

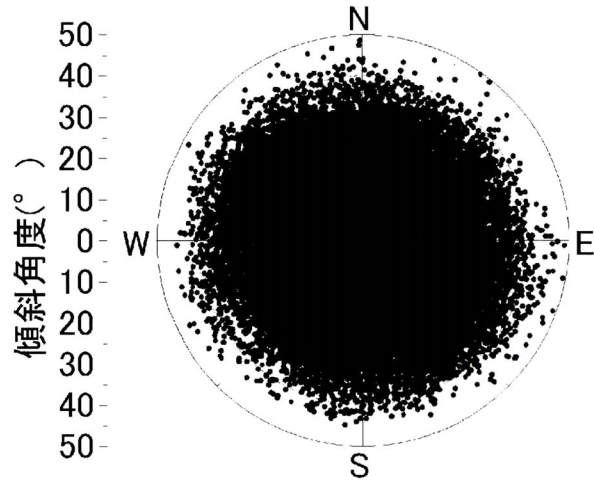


(b) 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位

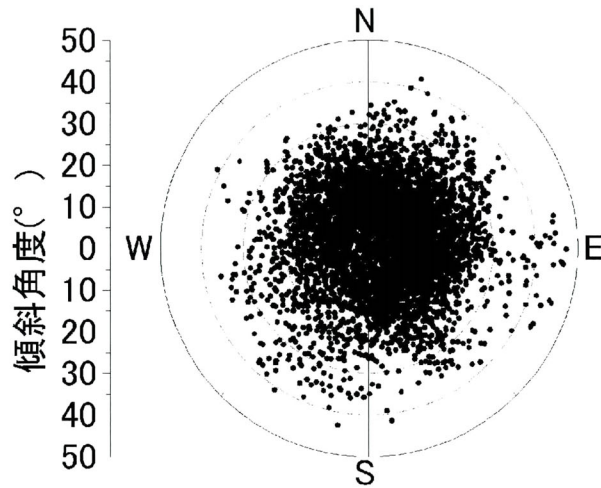


(c) 傾斜角の頻度分布(百分率表示)

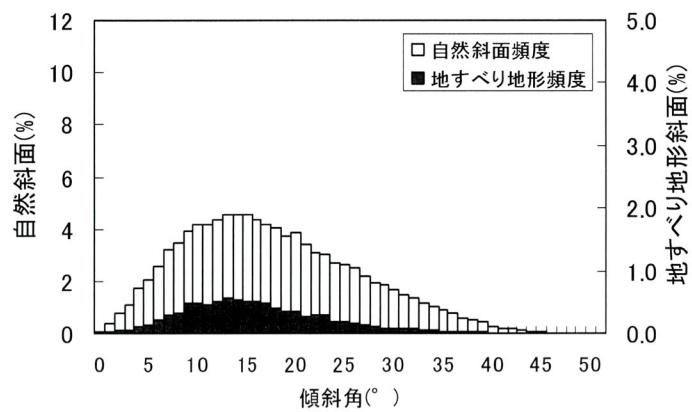
巻末図-5 久利層泥岩における斜面状況



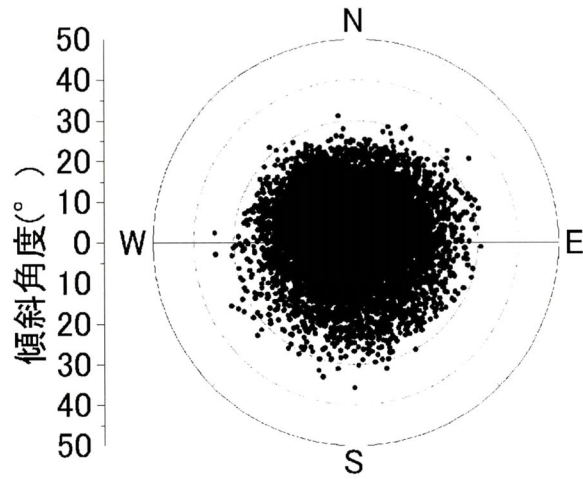
(a) 自然斜面の傾斜角と傾斜方位



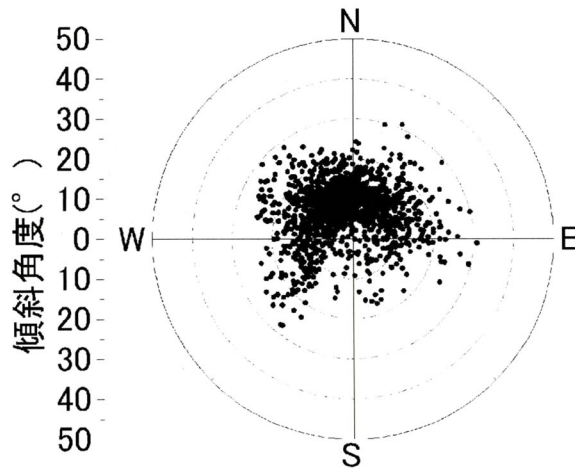
(b) 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位



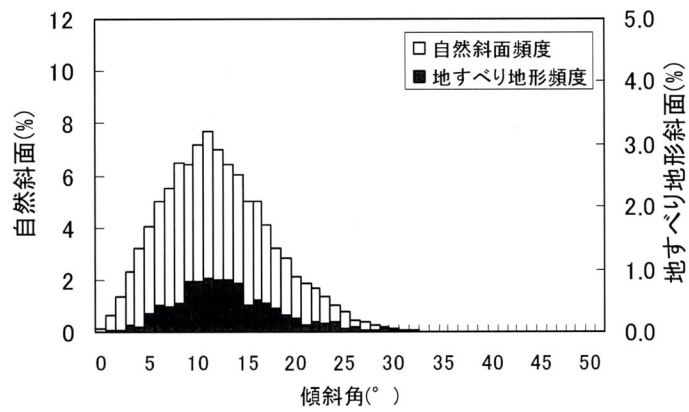
(c) 傾斜角の頻度分布(百分率表示)



(a) 自然斜面の傾斜角と傾斜方位



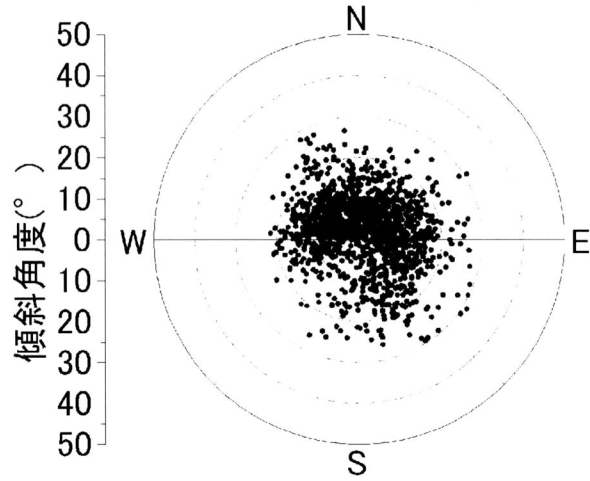
(b) 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位



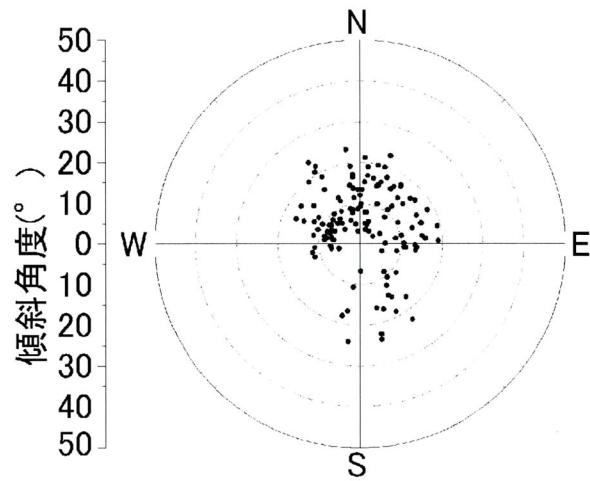
(c) 傾斜角の頻度分布(百分率表示)

巻末図-7 大森層礫岩における斜面状況

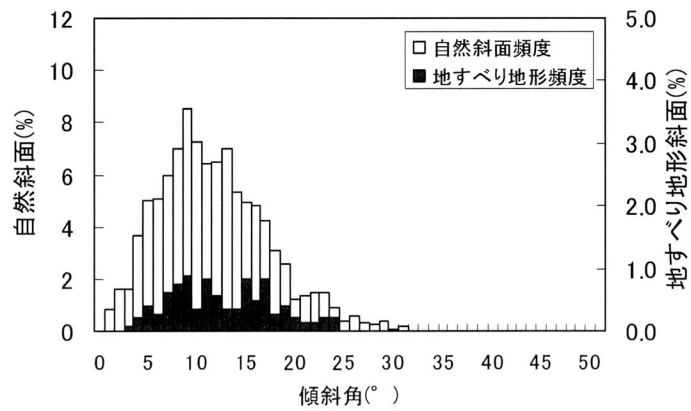
巻末資料



(a) 自然斜面の傾斜角と傾斜方位

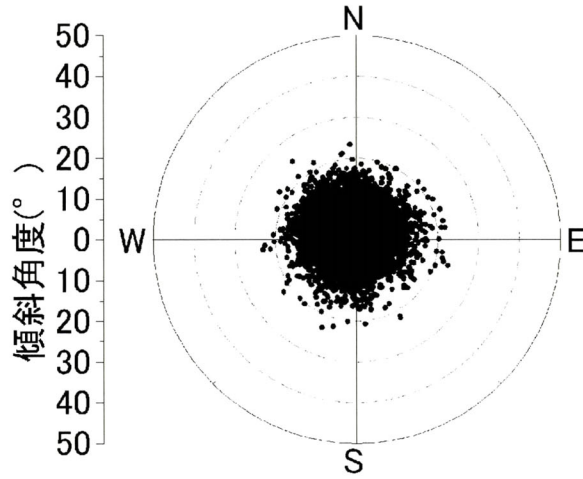


(b) 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位

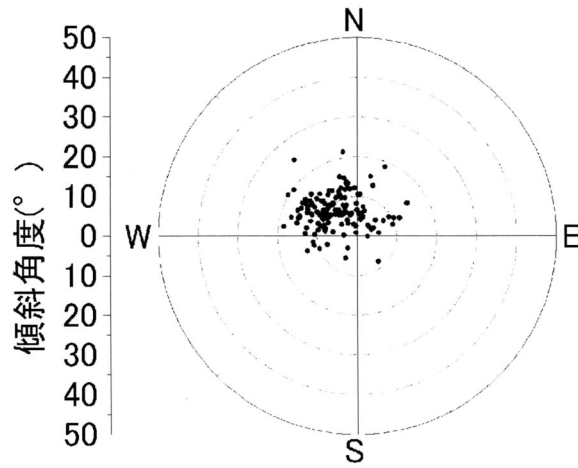


(c) 傾斜角の頻度分布(百分率表示)

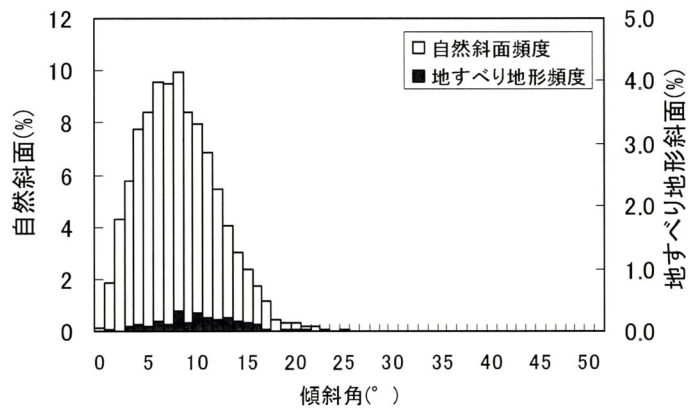
巻末図-8 布志名層礫岩における斜面状況



(a) 自然斜面の傾斜角と傾斜方位



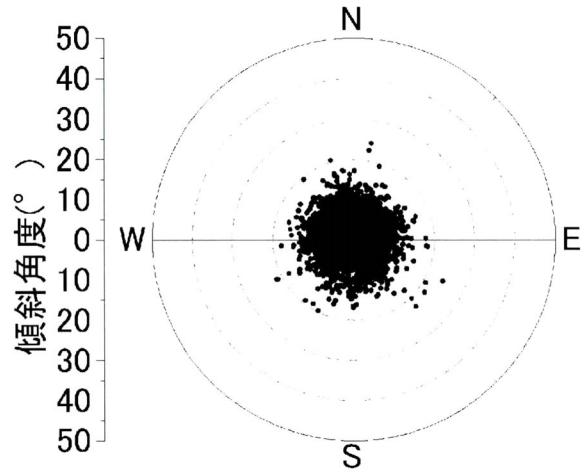
(b) 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位



(c) 傾斜角の頻度分布(百分率表示)

巻末図-9 布志名層砂岩における斜面状況

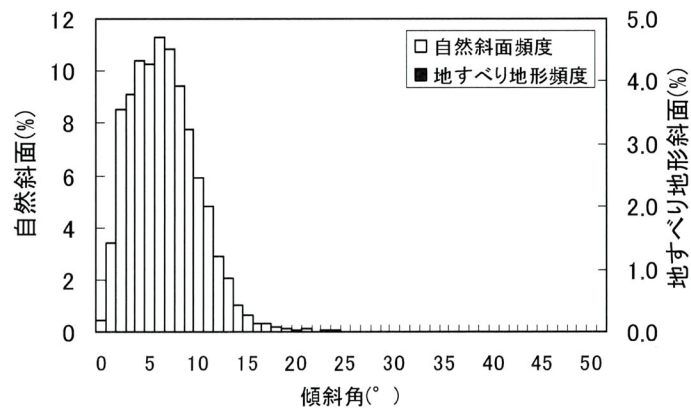
巻末資料



(a) 自然斜面の傾斜角と傾斜方位

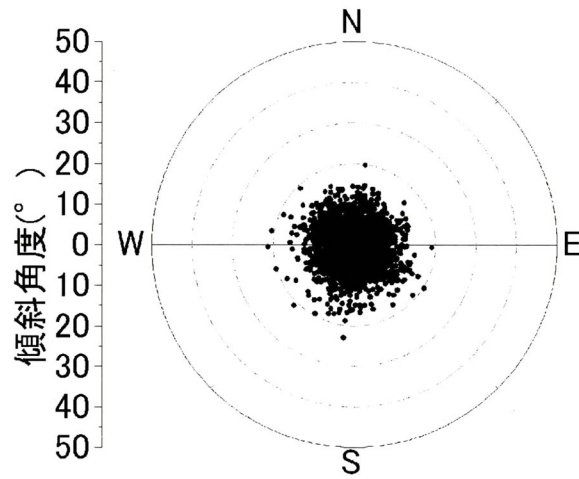
地すべり地形斜面は分布しない

(b) 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位

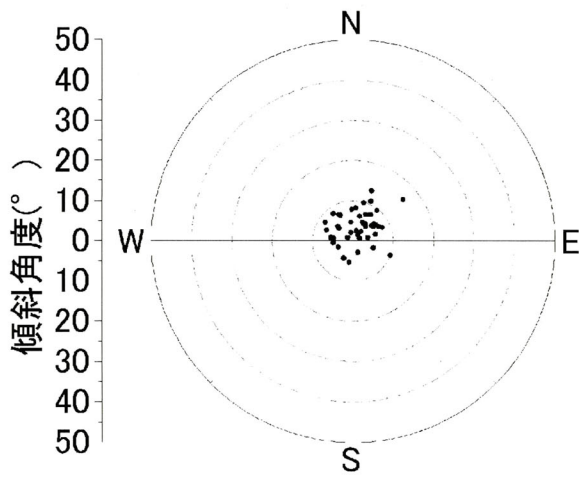


(c) 傾斜角の頻度分布(百分率表示)

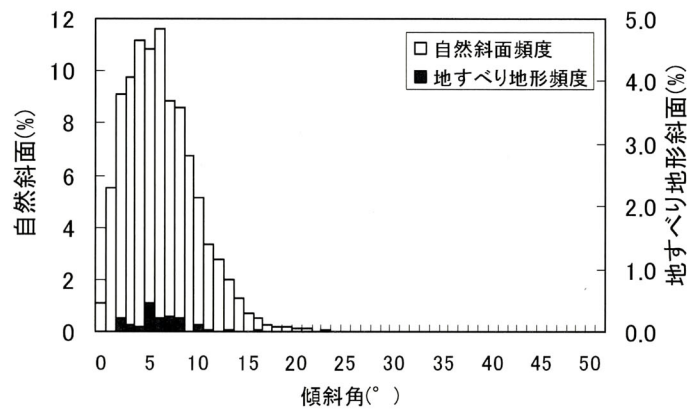
巻末資料



(a) 自然斜面の傾斜角と傾斜方位



(b) 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位



(c) 傾斜角の頻度分布(百分率表示)

巻末図-11 松江層砂岩における斜面状況