DEM地形解析による山口県下の三郡変成岩類からなる地すべり斜面の強度推定

Strength estimation of landslide slope consisting of the Sangun metamorphic rocks in Yamaguchi Prefecture by DEM-based landform analysis.

長嶺元二* Genji NAGAMINE / 財団法人道路保全技術センター Road Management Technology Center

山本哲朗 Tetsuro YAMAMOTO / 山口大学大学院理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

大坂伊作 Isaku OSAKA / イズテック株式会社 Izutec Co., LTD

キーワード：DEM, 傾斜量, 地すべり, 三郡変成岩類, セン断抵抗角

Key words: DEM, natural slope, landslide, Sangun metamorphic rocks, angle of shear resistance

1. はじめに

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本質である。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、便利で実用的である。ただし、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。

ところで、高速道路調査会（1985）¹⁾や吉松ら（1991）²⁾は、全国から収集した地すべり事例を分析し、地すべりのせん断抵抗角が地すべり斜面の勾配と強い相関があることを明らかにしている。これに従えばせん断抵抗角は地すべり斜面勾配を参考にして適切に推定できると考えられるが、その手法は実用化されていない。強度定数のうち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。

近年、数値地図やGISの活用によりDEM地形解析が飛躍的に容易になっている。DEM地形解析により求められる地形指標には様々なものがあり、地すべりや崩壊の危険度評価に対する地形指標の寄与度に関して等、これまでに多くの研究が行われている。しかし、地形指標を直接的に斜面の強度を推定するための工学的指標として扱った研究例はない。

本研究は、地すべり斜面の勾配を参考にそのせん断抵抗角を推定するための基礎として、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比較し、両者の関係を明らかにすることを試みたものである。斜面安定検

討において勾配が重要な地形指標であることは言うまでもなく、それは誰もが直感的に理解でき簡便に取り扱うことのできる指標である。

研究の対象は山口県下の三郡変成岩類である。結晶片岩は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が、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、また、山本ら^{3)~7)}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いることから対象とした。

2. 地すべり斜面の傾斜角とすべり面強度の関係

高速道路調査会（1985）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、地すべりの発生を現場での大型せん断試験に見立て、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 関係図上に整理し直してすべり面の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（表-1および図-1）。

一方、吉松ら（1991）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 との間には比較的良好な直線関係があり、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（表-2および図-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

* 連絡著者 / corresponding author
〒730-0012 広島市中区上八丁堀7-1

表-1 地すべり斜面勾配 θ とすべり面の強度定数の関係¹⁾

注) 引用文献に示される「中間値」は削除している

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=7.8kN/m ² $\phi=21^\circ$	c=0kN/m ² $\phi=5^\circ$
10~<20°	20	c=16.7kN/m ² $\phi=22^\circ$	c=0kN/m ² $\phi=16^\circ$
20~<30°	19	c=11.8kN/m ² $\phi=27^\circ$	c=0kN/m ² $\phi=22^\circ$
30~<40°	13	c=11.8kN/m ² $\phi=31^\circ$	c=0kN/m ² $\phi=28^\circ$

図-1 すべり面の勾配とせん断抵抗角 ϕ の関係¹⁾

べり斜面勾配と ϕ はほぼ等しくなる。

上記の結果によれば、地すべり地形斜面の傾斜角はすべり面のせん断抵抗角に対比できると考えられる。

3. DEM地形解析

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50mメッシュ(標高)、山口県の5万分の1地質図幅⁹⁾、防災科学技術研究所発行の地すべり地形分布図^{9),10)}であり、それぞれの地図情報をGISにレイヤーとして取り込んだ。ただし、地すべり地形分布データの取得について、5万分の1地形図における「宇部」,「宇部東部」,「野島」,「光」には県下の三郡変成岩類に対する面積割合で約3.4%が分布するものの、地すべり地形分布図が解析時点では未発行であったため除外した。図-3に地すべり地形分布図の例を示す。また、図-4にGISに取り込んだレイヤーの概要を示す。地すべり地形斜面におけるデータは滑落崖と移動体を一まとめにして取り込んだ。ただし、地すべり地形が複数の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、データ取得領域(ポリゴン)を設定した。

傾斜角 S および傾斜方位 A_s の算定は沖村ほか(1991)¹¹⁾や神谷ほか(2000)¹²⁾に従い計算式(1)~(4)により行った。図-5に模式的に示すように、これら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。ここで、

表-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≤ θ <10	46	5.69	9.0	0.944
10≤ θ <15	132	3.33	14.8	0.951
15≤ θ <20	127	0.39	20.7	0.935
20≤ θ <25	95	4.31	23.6	0.941
25≤ θ <30	40	3.92	27.9	0.930
30≤ θ	27	7.16	30.0	0.944

図-2 地すべり斜面勾配とせん断抵抗角 ϕ' の関係²⁾

S は傾斜角, A_s は傾斜方位, S_x および S_y はそれぞれX方向およびY方向の傾斜, D_x および D_y はそれぞれX方向およびY方向の格子間距離である。

$$S = \sqrt{(S_x^2 + S_y^2)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$A_s = \tan^{-1}(S_y/S_x) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$S_x = \frac{(H_{11} + H_{21} + H_{31}) - (H_{13} + H_{23} + H_{33})}{6D_x} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$S_y = \frac{(H_{11} + H_{21} + H_{31}) - (H_{13} + H_{23} + H_{33})}{6D_y} \quad \dots\dots\dots(4)$$

4. 山口県下の三郡変成岩類

4.1 分布と構造

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し、県の面積のうちの9.4%を占める(図-6)。既往文献¹³⁾によれば地質構造は表-3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。

図-3 地すべり地形分布図の例

図-4 GISに取り込んだレイヤー

図-5 傾斜量の計算に使用する格子点

4.2 地形的特徴

4.2.1 自然斜面と地すべり地形斜面の分布

表-4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474.8km²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77.8km² (13.6%)、砂質片岩が19.7km² (3.4%)であり、珪質片岩は0.9km² (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。

4.2.2 斜面の傾斜方位と傾斜角

図-7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。図

図-6 山口県下の三郡変成岩類

表-3 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

-8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り顕著な偏りを示さない様子がわかる。

図-9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-10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-11および写真-1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2箇所錦町北方に分布しており、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が、図-7に示した自然斜面の頻度分布状況、および表-4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。

表-4 自然斜面および地すべり地形斜面の面積割合

岩相	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	474.8	82.8	248	6.93	82.6	1.5
塩基性片岩	77.8	13.6	71	1.34	16.0	1.7
砂質片岩	19.7	3.4	11	0.10	1.2	0.5
珪質片岩	0.9	0.2	2	0.02	0.2	2.0
合計	573.2	100	332	8.39	100	5.7

図-9 地すべり地形斜面の傾斜角と傾斜方位散布図

図-7 自然斜面の傾斜方位と計測点数の関係

図-10 自然斜面及び地すべり地形斜面の傾斜方位と頻度

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-13および図-14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り、最頻傾斜角は各方位での度数分布について曲線近似し、頻度が最大となる傾斜角を読みとっている。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異方性が認められない。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、異方性が認められる。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

図-8 自然斜面の傾斜角と傾斜方位散布図

4.2.3 地すべり地形斜面の傾斜角

図-12にデータ数の少ない珪質片岩を除く各岩相の自然斜面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

図-11 錦町北方の巨大な地すべり地形

写真-1 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)

図-12 岩相別の自然斜面傾斜角頻度分布

えられる。

一方、最頻傾斜角は、自然斜面では 16° 前後ではほぼ一定しており、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° 前後ではほぼ一定しており、何れにも顕著な異方性は認められない。図-15に自然斜面と地すべり地形斜面の最頻傾斜角の度数分布(百分率表示)を示す。地すべり地形斜面の最頻傾斜角は $20\sim 25^{\circ}$ に卓越する。

5. 地すべり地形斜面の傾斜角とせん断抵抗角の比較

山本ら^{3)~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

図-13 自然斜面および地すべり地形斜面の傾斜方位と傾斜角

図-14 自然斜面と地すべり地形斜面の傾斜方位と傾斜角

(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10m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-5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、片理構造による異方性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、これらは片理構造による異方性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-16に試験結果を整理した $\sigma'_m - \tau$ 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° の狭い範囲内であって、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

図-15 自然斜面と地すべり地形斜面の最頻傾斜角

化する。たとえば、より詳細なメッシュ間隔のDEMを用いれば、当然ながら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20m規模の崩壊・地すべりであれば20m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る。

6. 結論

山口県下の三郡変成岩類を対象としたDEM地形解析結果をもとに、地すべり地形斜面の最頻傾斜角には片理構造に起因した異方性が認められず、それは風化土試料のせん断抵抗角とほぼ等しいことを明らかにした。本研究から得られた知見とその活用に対する考えをまとめると次のとおりである。

- (1) 山口県下の三郡変成岩類は片理構造の影響により大局的にNW方向の斜面が流れ盤となりやすいものと推察され、地すべり地形斜面の最大傾斜角にはNW方向とSE方向において大きくなる異方性が認められる。しかし、地すべり地形斜面の最頻傾斜角に異方性は認められない。
- (2) 山口県下の三郡変成岩類分布域における地すべり地形斜面の最頻傾斜角は20~25°に卓越し、一面せん断試験による風化土水浸試料のせん断抵抗角23~28°と近い値を示す。地形解析に用いるDEMのメッシュ間隔を対象とした崩壊・地すべりの規模と同程度にすれば両者の値はより近くなる。
- (3) 上述のから、地すべり斜面のせん断抵抗角の推定には、地すべり地形斜面の最頻傾斜角を参考にすることができる。実務においては、このせん断抵抗角と地すべり土塊の層厚から求まる粘着力の両者を考慮し、バランスよく強度定数を設定するのが有効であろう。

引用文献

- 1) 高速道路調査会 (1985): 地すべり地形の安定度評価に関する研究報告書。ページ数なし
- 2) 吉松弘行・丸山清輝・檜垣大介・網木亮介・吉田克美 (1991): 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.
- 3) 山本哲朗・鈴木素之・松本 直・国広清己 (1999): 花崗岩の

表-5 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-16 試験結果の σ_n' - τ 関係図

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.

- 4) 山本哲朗・鈴木素之・国広清己・原田 博 (2000): 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.
- 5) 山本哲朗・北村晴夫・市川博之・寺山 崇・勝部安昭 (2003): 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.
- 6) 山本哲朗・大原資生・西村祐二郎・瀬原洋一 (1996): 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.
- 7) 山本哲朗・鈴木素之・宮内俊彦・植野泰史 (1999): 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.
- 8) 山口県 (1968): 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」.
- 9) 防災科学技術研究所 (2006): 地すべり地形分布図, 第27集「広島」.
- 10) 防災科学技術研究所 (2006): 地すべり地形分布図, 第28集「山口」.
- 11) 沖村 孝・吉永秀一郎・鳥井良一 (1991): 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-, 土地造成工学研究施設報告, Vol. 9, pp. 19-39.
- 12) 神谷 泉・黒木貴一・田中耕平 (2000): 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.
- 13) 中国地方土木地質図編纂委員会編集 (1984): 中国地方土木地質図解説書, pp. 93-96.

(原稿受付2008年9月24日, 原稿受理2009年3月13日)