

## 第七話 地すべりと流れ盤 (つづき)

## 7.3 地質構造と地すべり発生位置

褶曲軸と地すべりの関係に関して、地すべり地は背斜構造と空間的分布が一致することが多いことは古くから地質学分野で注目されていた。ここで図-80 に示す褶曲に関する用語を確認しておきたい。

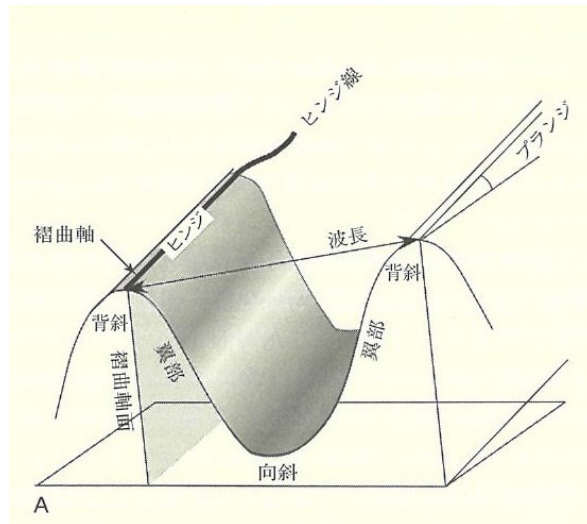


図-80 褶曲の模式図と用語. 千木良(2018)<sup>1)</sup>

岩松ら(1974)<sup>73)</sup>は、新潟県山中背斜を例に、地質と地すべりの関係を構造地質学的調査と試料採取を用いた高圧三軸圧縮試験結果から、背斜と力学特性との関係を調べている。図-81 は、地形図上に曲線で表示した地すべり地の分布図を示している。図中央の実線は背斜軸であり、図からは翼部には地すべり地があまり見られないのに、軸部には多く地すべりが発達しているのが読み取れる。

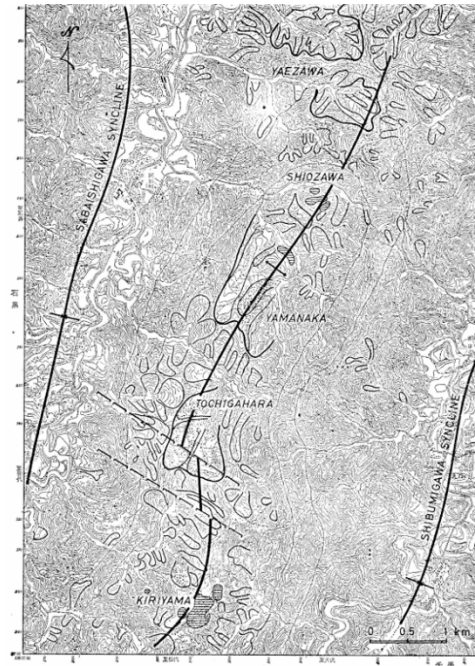
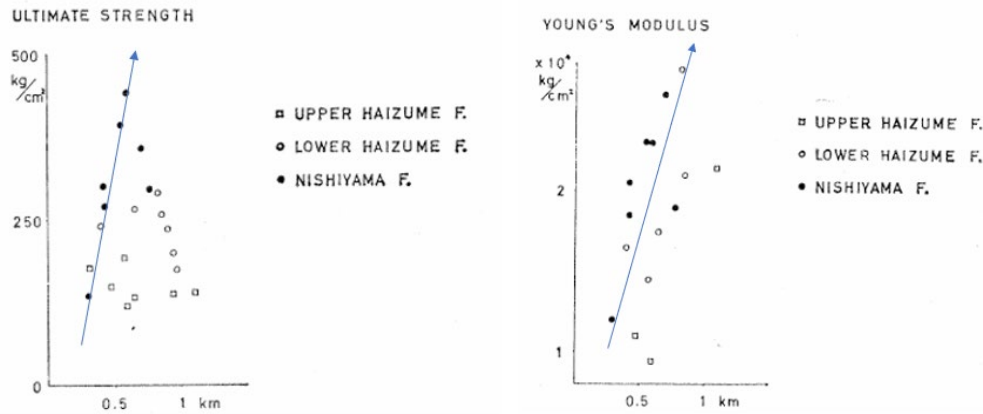


図-81 地すべり分布図.

出典：岩松ら(1974)<sup>73)</sup>

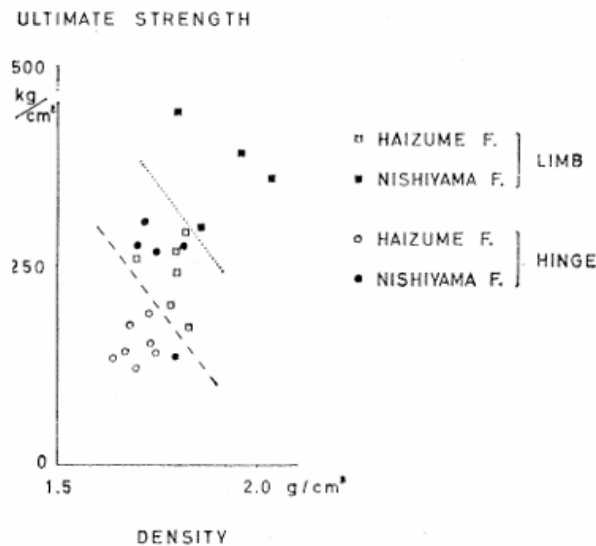
岩松らは、構造地質学調査から節理系は背斜軸部において発達が著しく、褶曲軸にほぼ直交し、かつ層理面に対してもほぼ垂直であることを見出して、この節理系は褶曲の発達によってできた伸張性割れ目であると考察している。力学的特性の調査のために、コアリング・ドリルを用いて層理面に垂直に試料を採取した。採取した試料は、灰爪層上部と下部の砂質シルト岩と西山層上部の泥岩である。採取試料を風乾した後に一軸圧縮試験および高圧三軸圧縮試験を実施した。高圧三軸圧縮試験の拘束圧は最大  $1000\text{kg}/\text{cm}^2$  までの5種類である。拘束圧の増大に伴い、脆性的破壊形式から延性的破壊形式に移行することが観察されている。

図-82は、背斜軸から試料採取地点までの水平距離に対して一軸圧縮強度、および割線係数の値をプロットしたものである。図中、西山層泥岩のデータにそって直線を描いているように、背斜軸から離れるにしたがって、一軸圧縮強度と割線係数がほぼ直線的に増大する結果となっている。



図一82 一軸圧縮強度（左図）および割線係数（右図）と背斜軸から水平距離の関係  
出典：岩松ら（1974）<sup>73)</sup>（原図に傾向を示す直線を加筆）

図一83 は、圧縮強度と密度の関係を背斜部（HINGE）と翼部（LIMB）に分けて示したもので、軸部では密度・強度ともに小さく、翼部ではともに大きくなる傾向を示している（図中西山層泥岩の■が翼部、●が背斜部）。



図一83 背斜部と翼部の圧縮強度と密度の関係。 出典：岩松ら（1974）<sup>73)</sup>

以上の結果から、岩松らは「褶曲の軸部と翼部では受けた造構応力が異なり、軸部では流動が相対的に大きく、岩石に内部構造が乱されて“弱く”なっている。そのため、地すべりに対する抵抗力も低下する。その上、開口端の伸長節理が発達するような引っ張り応力下に置かれたため、さらに強度が低下し、その割れ目によって地下水が浸透するなどして、風化が促進される。その結果、褶曲部軸部に地すべりが多発するものと思われる。」と結論付けている。これが佐藤による図一81の地質学からの解釈である。

中越地震の被害を調査した小長井（2004）<sup>66)</sup>は、堆積岩の褶曲による力学的特徴として「背斜軸では堆積岩が張力を受けもろくなり、一方で下に湾曲する向斜軸では圧縮を受け硬くなる」と端的に表現している。近年、模型実験、数値解析による褶曲の研究<sup>74) 75)</sup>が行われており、近い将来、地質学的現象を力学体系から定量的に記述することが可能になることを予感させる。

## 7. 4 流れ盤斜面の安定解析

第六話で面構造と斜面の関係を見た。図-84 は図-63 の再掲である。

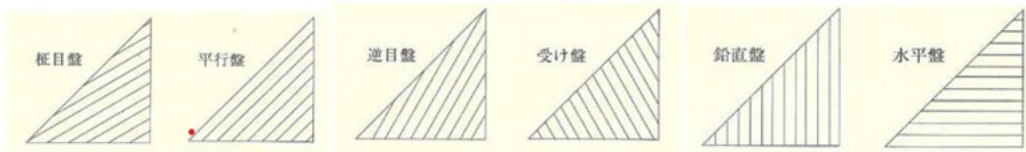


図-84 面構造と斜面の関係。

(図-63 の再掲)

層理面をすべり面とした場合の崩壊メカニズムを考えると、力学的には次の2つの条件が必要である。

- ① 運動学的に可容な速度場の形成が可能である。
- ② すべり面上での破壊基準を満たす。

図-84 に見るように平行盤、逆目盤は斜面の足元が拘束されているので、①の条件を満たすのは柎目盤のみである、すなわち、斜面角 $\alpha$ は層理角 $\beta$ より大きい。すなわち  $\beta < \alpha$ 。ただし第六話で見たように斜面足元で座屈褶曲が発生し連続的なすべり面が形成されると①の条件を満たす場合もある。②の条件を満たす場合、図-26 で示した斜面上のブロックの安定問題で述べたように、滑らそうとする力/せん断抵抗力との比を安全率 $F$ とすると、 $c = 0$ の場合  $F = 1$  となるには  $\tan \alpha = \tan \phi$ 、すなわち  $\alpha \leq \phi$  である。無限斜面に平行な地下水流がある場合は、安全率は次式となる。

$$F = \gamma \tan \phi / \gamma_{\text{sat}} \tan \alpha$$

ここで $\gamma$ は土の湿潤重量、 $\gamma_{\text{sat}}$ は土の飽和重量である。 $\gamma / \gamma_{\text{sat}}$ はほぼ1/2程度であるので地下水流がある場合は、②の条件は  $\tan \alpha = \tan \phi / 2$  となる。

無限に高い斜面は存在せず、斜面には岩の強度と斜面勾配に応じた限界高さが存在する。 $c > 0$ の場合、図-85 に示す斜面勾配 $\beta$ 、斜面高さ $H$ の限界高さ $H_c$ は、すべり線を直線と仮定した場合、

$$H_c = (4c / \gamma) \times \sin \beta \cdot \cos \beta / (1 - \cos(\beta - \phi))$$

と表せる。そして、このすべり線法で算出されるすべり線の傾斜角度 $\alpha$ は

$$\alpha = (\beta + \phi) / 2$$

である。

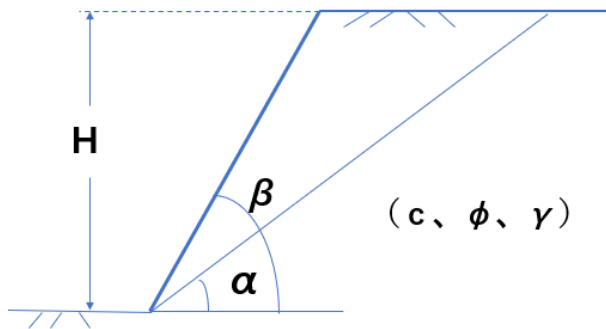


図-85 限界高さを求める直線すべり法

斜面高さがそれほど高くない場合は、図-85のように楔形の土塊が直線すべり線に沿って崩壊するのが観察される。しかし斜面がある高さ以上だと崩壊形態が変化するようである。7.3で述べた高圧三軸圧縮試験結果では、拘束圧の増加に伴い供試体は脆性的破壊形式から延性的破壊形式に移行することが観察されている。すなわち岩は低拘束圧下では小さなひずみでピーク強度に達した後、ひずみ軟化型となるが、高い拘束圧下では大きなひずみに至らなければピーク強度に達しないひずみ硬化型の応力～ひずみ曲線となる傾向にある。図-85に見るように直線すべり線上の拘束圧は、法尻から法肩の直下にいたるまで増加する。一方、斜面は引張り応力場となっているので鉛直方向に引っ張り亀裂が発生したところで折れ曲がる椅子型のすべり形状の方が崩壊しやすくなる。これが佐藤(2025)<sup>72)</sup>が観察した図-75である。したがって、低い斜面では平面すべり型、高い斜面では椅子型のすべり形態となる場合が多いと考えられる。

斜面は引張り応力場となっているので、条件がそろえば引っ張り亀裂が発生する。土質力学では、Rankine土圧の主働土圧の式で

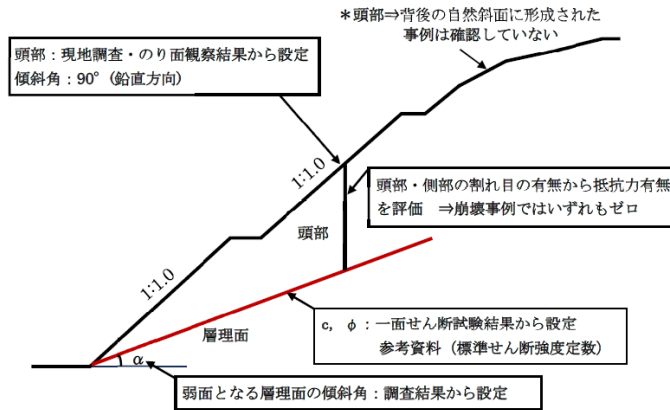
$$\sigma = \gamma z \tan^2(45 - \phi/2) - 2c \tan(45 - \phi/2)$$

で $\sigma < 0$ となる式から、引っ張り亀裂の深さ $z$ を次のように求めることが行われる。

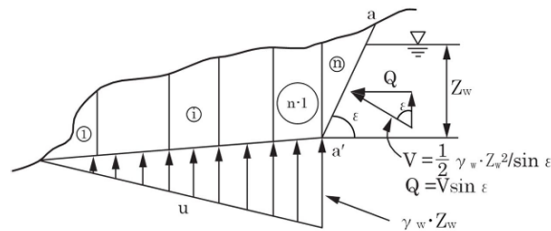
$$z = 2c / \gamma \times \tan(45 \text{度} + \phi/2)$$

この深さの引っ張り亀裂が発生して図-75のような椅子型形状のすべり面が形成されることになる。

椅子型崩壊形式では頭部の処理が問題となるが、引張亀裂部分には抵抗は働かないとする仮定の方がより実態を説明することが遠心実験<sup>76)</sup>および現場観測<sup>72)</sup>の分析から知られている。佐藤<sup>72)</sup>は、図-86に示すような観測結果をもとに、図-87に示す流れ盤の安定解析をSHIN-Janbu法を用いた二次元断面の計算による安定図表を提案している。椅子型の平面すべり形状に対して、安定図表を作成、パラメーターは、 $\phi$ 、すべり面長さ $L$ 、層理面の傾斜角度 $\alpha$ について広範な図表を示して、崩壊事例によって有効性を検証している。図-88はその一例である。

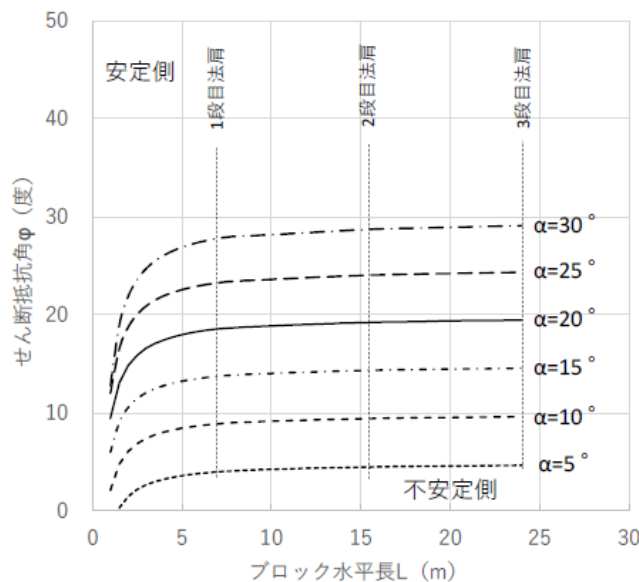


図一86 安定性評価の設定条件概念図 出典：佐藤直行 (2025) 72)



$$F = f_0 \frac{\sum_{i=1}^{n-1} c' b + (W - ub) \tan \varphi' + W_n' \tan \varphi'}{\sum_{i=1}^{n-1} W \tan \alpha + W_n' \tan \alpha_{n-1} + Q} = \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} = \frac{\tan \varphi'}{\cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha \cdot \tan \varphi' / F)}$$

図一87 Shin-Janbu 法の説明図と安全率表現式 出典：佐藤直行 (2025) 72)



図一88 安定図表の例. 出典：佐藤直行 (2025) 72)



## 参考文献

- 73)岩松暉、服部昌樹、西田彰一 (1974)：地すべりと岩石の力学的性質-新潟県山中背斜を例として-、地すべり、Vol. 11、No. 1(通巻第 37 号)、13-20.
- 74)上田圭一 (2011)：模型実験による逆断層・活褶曲帯の発達過程の検討、電力中央研究所、研究報告 N10049.
- 75) 野田 利弘、豊田 智大、大西 和也 (2023)：分岐理論に基づく剛性の異なる堆積構造に起因した座屈褶曲の波長決定メカニズムの解明、第 58 回地盤工学研究発表会
- 76)石丸真、河井正 (2008)：遠心力模型実験による岩盤斜面の地震時崩壊挙動に関する検討 一 流れ盤斜面の平面すべり崩壊 一、電力中央研究報告 N07022.

## まとめ

「斜面の理解に向けて」と題して 12 回に亘ってこのコーナーを書き続けてきた。執筆内容は、下記の七話である。

- 第一話 風化のメカニズム (No.11, No.12, No.13)
- 第二話 風化に関する現場データの蓄積と活用(No.14)
- 第三話 風化に伴う物性の変化 (No.15)
- 第四話 季節変動による斜面の劣化 (No.16)
- 第五話 劣化を考慮した斜面安定の評価 (No.17, No.18, No.19)
- 第六話 面構造と岩盤クリープ (No.20)
- 第七話 地すべりと流れ盤 (No.21, No.22)

第一話では、花崗岩の風化イメージ、粘土斜面の物理的風化メカニズム、堆積性軟岩と火山灰の化学的風化メカニズムを述べ、物理的風化に比べて化学的風化は相対的に長期に亘って継続する可能性について触れた。第二話では、高速道路における切土のり面の風化・劣化の概念図を示し、弾性波速度計測を用いた風化層厚の推定の事例と現場データを用いた研究の流れを概観し、第三話では、化学的風化に伴う物性の変化、風化に伴う強度定数の変化、 $c$ の無い世界、風化に伴う透水係数の変化について述べた。第四話では、温度の季節変動に関する解析結果と湿度の季節変動に関する遠心実験結果を紹介した。第五話では、岩石の風化速度の研究、岩石・岩盤の風化速度の数学モデルと検証データ、斜面の劣化を考慮した安定解析、安定解析におけるせん断強度低減法、現場計測と将来予測、斜面補強施工による安全率の経年変化について述べた。第六話では、面構造の重要性、面構造と崩壊形式、面構造と岩盤クリープ性地質構造、地形と内部構造、トップリングについて述べ、第七話では、崩壊性地すべり事例集、切土のり面崩壊事例、地質構造と地すべり発生位置、流れ盤斜面の安定解析について述べた。振り返ってみると、執筆開始時の計画より少し広い範囲の話題を扱ってきたように思う。読んでいただいた方の情報提供となれば幸甚である。また、筆者の誤りや誤解があればご教示願いたい。これでシリーズ 2 「斜面の理解に向



けて」の最終回とする。シリーズ3として、防災予算、災害財政などを学んでみたいと考えている。

## バックナンバー

### シリーズ2

<u>No.21</u>	<u>2026年4月17日</u>
<u>No.20</u>	<u>2026年4月3日</u>
<u>No.19</u>	<u>2026年3月19日</u>
<u>No.18</u>	<u>2026年3月6日</u>
<u>No.17</u>	<u>2026年2月20日</u>
<u>No.16</u>	<u>2026年2月6日</u>
<u>No.15</u>	<u>2026年1月21日</u>
<u>No.14</u>	<u>2026年1月9日</u>
<u>No.13</u>	<u>2025年12月19日</u>
<u>No.12</u>	<u>2025年12月5日</u>
<u>No.11</u>	<u>2025年11月21日</u>

### シリーズ1

<u>No.10</u>	<u>2025年11月7日</u>
<u>No.9</u>	<u>2025年10月24日</u>
<u>No.8</u>	<u>2025年10月10日</u>
<u>No.7</u>	<u>2025年9月26日</u>
<u>No.6</u>	<u>2025年9月12日</u>
<u>No.5</u>	<u>2025年8月22日</u>
<u>No.4</u>	<u>2025年8月 8日</u>
<u>No.3</u>	<u>2025年7月25日</u>
<u>No.2</u>	<u>2025年7月 4日</u>
<u>No.1</u>	<u>2025年6月20日</u>

