

岩盤地すべり解析に用いるバランス断面法を模擬した 弾塑性有限要素解析手法の提案

岩盤地すべり バランス断面 弾塑性有限要素解析法

株式会社環境地質 正会員 ○瀬崎章太郎
群馬大学 国際会員 若井明彦
株式会社環境地質 正会員 大野博之
同 非会員 小坂英輝

1. はじめに

岩盤地すべりのトップリングのような重力変形からすべり面形成に至るプロセスは、構造地質学で発達した幾何学的解析ツールであるバランス断面法によって再現可能となりつつある。一方、有限要素解析の進展も近頃目覚ましく、Lagrange 法による大変形問題の解析も可能となり、地すべりの数値シミュレーションも現実味をおびたものとなってきた。筆者らは、岩盤斜面のすべり面形成前後を含めたプロセスを幾何学・力学的に理解することを目的とし、バランス断面法を模擬した弾塑性有限要素法（以下、弾塑性 FEM）の岩盤解析手法の開発に取り組んでいる。本稿では、すべり面形成過程の岩盤解析について報告する。

2. バランス断面法

バランス断面法は、変形前後の地層の長さ・厚さが不変、あるいは面積が一定であると仮定して断層を作図することで、変形形状と断層やすべり面との関係を示すことが可能である。流れ盤や受け盤斜面等の地質構造と岩盤斜面における重力変形の様式は、事例研究により類型化が進められている。その変形様式をバランス断面法で再現した例を図-1¹⁾に示す。

受け盤斜面の変形様式として、トップリングが挙げられる。トップリングをバランス断面法で再現すると、変形部の形状や変形の程度に応じて高角度な面に沿ってずれや隙間が生じ、部分的に変形面の底部に沿ってすべり面が形成される（図-1 上）。高角度で斜面方向へ傾斜した節理が発達するような逆目盤斜面の変形様式として、重力方向の短縮により座屈褶曲が形成されるモデルが挙げられる。この座屈褶曲をバランス断面法で再現すると、トップリングと同様にずれや隙間と、すべり面が形成される。（図-1 下）。このようにバランス断面法によって、すべり面が形成されるプロセスを再現すると、その過程で高角度な面に沿ってずれや隙間が生じることが分かる。次章では、このような高角度な面に沿ったずれや隙間を再現可能な弾塑性 FEM 解析を試みる。

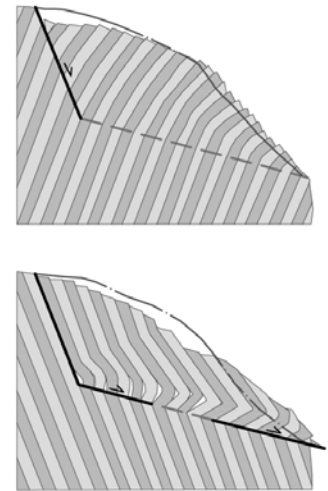


図-1 バランス断面図。

3. 弾塑性 FEM を用いたバランス断面法の模擬解析

本研究では、図-1 に示すような板状節理の発達した岩盤斜面を対象とし、既存の弾塑性 FEM 解析コード²⁾を改良して、バランス断面法による解（変形性状）を模擬することのできる解析手順の開発を試みた。現時点では、節理を表現する不連続面を岩盤部と同じヤング率を有する薄いソリッド要素（厚さ 5cm；ポアソン比・ダイレイタンスー角・単位体積重量をいずれもゼロと仮定）で簡易にモデル化している。なお、同要素の長手方向のせん断すべり（弾完全塑性モデル；Mohr-Coulomb 規準）と同直角方向の剥離（本稿では引張り強度をゼロと仮定）はそれぞれ考慮されており、剥離の発生した要素については、要素剛性を極めて小さくした上で全体剛性行列を更新し、修正 Newton-Raphson 法の反復計算にこれを反映させて残差力処理の収束性を向上させた。以上により、自重により撓んだ短冊状の岩片群内で、隣接する岩片との間でしばしば局所的な剥離区間を生じることなどの安定的な再現が容易となる。また、さらに大きな変形を想定した解析を行うことができるように、節理部の薄い要素以外の一般の岩盤部の要素においては、Updated Lagrange 定式化によって大変形効果を考慮した。

また、バランス断面法で斜面変形を求解する際の前提としての作用外力については、本稿では、単純な自重の作用のみであると仮定し、せん断強度低減法（SSRM）に基づいて、弾性過程から徐々に実際のせん断強度に強度低減させながら全体の塑性変形の進展を追跡した。なお、解析の目的等を勘案して、全変形成分から弾性材料仮定時の自重変形成分を差し引いた成分、すなわち自重変形のうちの塑性変形成分のみに着目して分析することにした。

試行的な解析ケースとして実施した各ケースにおける材料定数一覧を表-1 に示す。岩盤部は線形弾性、節理部に相当する薄い要素は弾完全塑性材料（Mohr-Coulomb 降伏規準）を仮定した。各ケースの二次元有限要素分割図を固定条件とともに図-2 に示す。これらのケースは対象系の傾斜方向を変えた一連のケース群である。短冊状の岩片が自由に撓むことを再現するため、各要素が単独（単列）でも曲げ変形を表現できるように、二次要素（8 節点要素）を使用する。以上の解析条件に対して SSRM を適用して自重変形のうちの塑性変形成分を描いたものが図-3 である。斜面の傾倒の程度に応じて重力の作用方向が変化するため、これに伴う斜面の変形性状も互いに異なる結果が得られている。特に、Case 1&2 のような場合には、バランス断面法で示された下部の座屈を弾塑性 FEM 解析ではたわみと伴に表現できている。

The Proposal of the Elasto-Plastic Finite Element
Analysis based on Balanced Cross Section used to
Geotechnical Analysis for Rockslide

Shotaro Sezaki (Kankyo Chishitsu Co., Ltd)
Akihiko Wakai (Gunma University)
Hiroyuki Ohno (Kankyo Chishitsu Co., Ltd)
Hideki Kosaka (Kankyo Chishitsu Co., Ltd)

表-1 各ケースにおける材料定数の一覧.

Case 1 および 2

	ヤング率 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (deg)	ダイレイタン シー角 ψ (deg)	単位体積重量 γ (kN/m ³)
一般の岩盤部	1.0E+03	0.4999	1.0E+07	0	0	25.
節理 (不連続面)	1.0E+03	0	3.0	0	0	—

Case 3

	ヤング率 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	粘着力 c (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (deg)	ダイレイタン シー角 ψ (deg)	単位体積重量 γ (kN/m ³)
一般の岩盤部	1.0E+04	0.4999	1.0E+07	0	0	25.
節理 (不連続面)	1.0E+04	0	30.	0	0	—

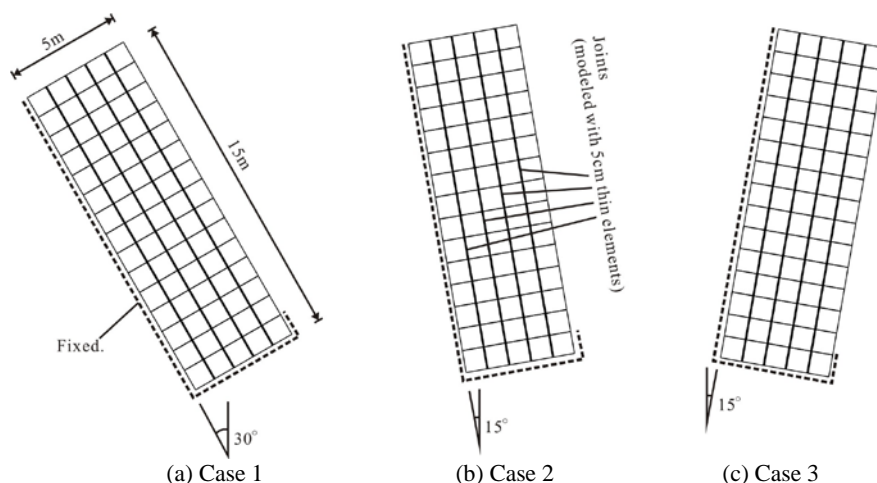


図-2 各ケースの解析対象の有限要素分割図 (1m 幅の短冊状の岩片 5 枚とその間の節理からなる斜面) .

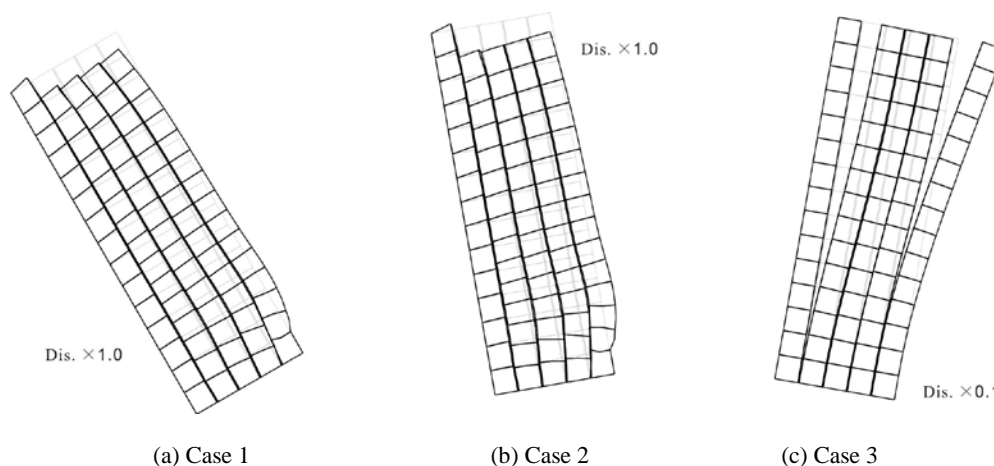


図-3 各ケースの解析結果 (SSRM による) : 自重変形の塑性成分.

4. まとめ

本研究により, バランス断面で示されるような変形を物性・力学パラメータを考慮できる弾塑性 FEM 解析で再現できる可能性が示された。現在, 本解析手法は開発初期段階であり, 解決すべき課題も多い。今後, 様々な意見を取り入れて, 本弾塑性 FEM 解析を改良していく予定である。

参考文献

- 1) 小坂英輝 (2015) : バランス断面法による岩盤斜面の初生地すべり地形とその変位率, 応用地質, Vol. 56, No. 5, pp.219-229.
- 2) 地盤工学会編 (2003) : 弾塑性有限要素法をつかう (地盤技術者のための FEM シリーズ③), pp.99-134. (注: 同書に収録されている解析コードは三次元版であるが, 本稿ではその二次元化したコードを使用)