

剛塑性有限要素法を適用した飽和粘性土地盤の安定解析

岐阜工業高等専門学校（正）水野 和憲
岐阜工業高等専門学校 建設工学専攻（学）○西川 直樹

1 はじめに

近年、計算技術の向上や数値解析法の発達により、地盤工学の分野においても有限変形理論に基づく土の変形解析が行われるようになり、基礎学問である土質力学の発展に大きく貢献している。しかし、地盤の支持力問題や斜面安定問題などを含む土構造物の設計実務においては、詳細な変形解析よりももっと簡便な安定解析によって設計計算が行われている。何よりもまず最初にその土構造物が安全に造られるかどうか重要である。

従来、地盤工学における安定解析には、極限解析に基づく円弧すべり法が主流となっている。円弧すべり法とは具体的に斜面安定問題を取り上げれば、地盤が剛体的に円弧状のすべり破壊をすると仮定し、切り取られた土塊のつり合い計算を解くことにより安全率や極限荷重を求め、その中で最小のものを試行錯誤的に探索していく。しかし、最初に仮定する円弧状の破壊領域の設定については、安全率の最小化演算を容易にするために、技術者の熟練や卓抜なセンスが必要となる。これを解消するために、本研究では以下の2つを目的とする。① 地盤の安定問題に剛塑性有限要素法の適用を試みる、② ①の結果と従来の円弧すべり法から得られる結果との比較を通して、剛塑性有限要素法の有用性を示す。

2 剛塑性有限要素法

剛塑性有限要素法とは、塑性加工の分野で開発された数値解析法であり、本研究ではこの解析手法を地盤工学の分野に適用することを試みる。円弧すべり法と同じ極限定理（塑性力学における上界定理や最大塑性仕事の原理）に基づき「最小化」したときのみ、地盤内応力分布は力のつり合い条件を満足することが分かっているの、後は破壊時における土の構成則（応力～塑性ひずみ速度関係）を用いて、不静定な地盤の力のつり合い問題を適切に解くと、崩壊機構と安全率（あるいは極限荷重）が同時に、しかも誰にでも求められるという特徴がある¹⁾。

このようにとても便利な数値解析法であるが、さらにこの計算を行う前に用意するものは、(i) 地盤の有限要素メッシュと境界条件、(ii) 载荷方法（表面力载荷あるいは物体力载荷）、(iii) 地盤の材料パラメータと初期パラメータ、の3点のみで十分であることも大きな特徴である。なお、上記の(ii) 载荷方法において、表面力载荷では地盤の支持力問題が適用でき、物体力载荷では、これを自重载荷とみなすことによって、斜面安定問題に適用可能となる。

3 支持力問題への適用

本研究が解析対象とする地盤は、軟弱地盤と言われるような正規圧密状態の飽和粘性土地盤である。本章では、この地盤上に構造物の基礎や盛土を急速に载荷した場合の、破壊時における極限支持力 Q_f を剛塑性有限要素法によって求める。

図1に計算で用いる有限要素メッシュと境界条件を示す。左右対称性を仮定した半断面地盤とし、簡単のため、計算は2次元平面ひずみ条件で行う。解析領域については、地盤の深さ $D=20\text{m}$ 、幅 $H=30\text{m}$ で地表面に载荷幅 $B=10\text{m}$ の基礎载荷を想定した。なお、基礎载荷端部では速度場が不連続となるため特異点処理を施した²⁾。次に地盤の材料パラメータおよび初期パラメータを表1に示す。地盤内は等方性・均質性を仮定した。

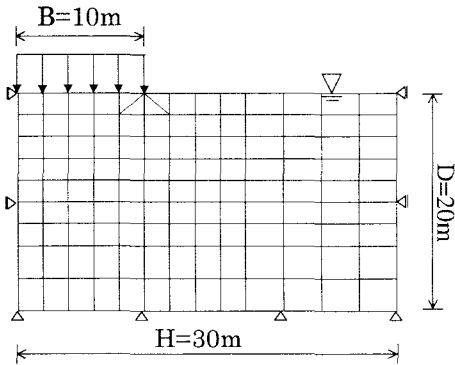


図1 有限要素メッシュと境界条件

表1 材料パラメータ	
圧縮指数 λ	0.131
膨潤指数 κ	0.016
限界状態定数 M	1.53
地盤内初期鉛直応力 σ_{v0}' [kPa]	10.0
側圧係数 K_0	1.0

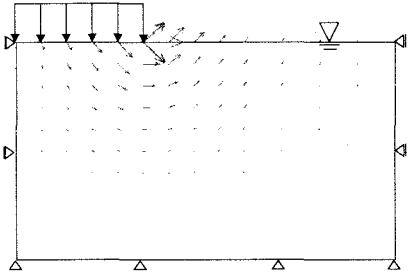


図2 速度場

解析結果として、地盤の極限荷重 q_f (単位面積あたりの Q_f の強さ: $q_f = \frac{Q_f}{B}$) は $q_f = 5.15c_u$ (c_u : 非排水せん断強度) となり、実際の極限支持力は $Q_f = 18.90[\text{kPa}]$ となる。この問題では、塑性学的な理論解が Prandtl によって求められていて、 $q_f = 5.14c_u$ である³⁾。なお、従来の円弧すべり法で計算を行うと、 $q_f = 5.5c_u$ となり⁴⁾、本解析で得られた結果は十分な精度で近似できていると言える。また、図2に極限状態における速度場を示すが、円弧状に塑性流動している様子が解析結果として求められる。

4 斜面安定問題への適用

斜面を有する地盤が自重で壊れるような斜面安定問題に剛塑性有限要素法の適用を試みる。そして、従来より実務で行われている円弧すべり法との比較を行い、本研究が提案する剛塑性有限要素法の有用性を示していく。この問題では、地盤に $1g$ 場の自重载荷を与え、何 g になったら斜面が壊れるのかを示す安全率が計算結果として算出される。

ここでは、斜面勾配を4パターン (90° , 60° , 45° , 30°) 用意し、斜面勾配の変化と安全率の変化の関係について検討した。この中で計算に用いた斜面を有する地盤 (斜面勾配 60° のみ) の有限要素メッシュおよび境界条件を図3に示す。なお、地盤の性状や材料パラメータ等は、前章の支持力計算で用いたものと同様とする。

解析結果として、まず斜面勾配 60° の速度場を図4に示す。次に図5に斜面勾配の変化と安全率の変化の関係を示す。図中には円弧すべり法で求められた安全率についても示しておく。この安全率は図4の速度場からすべり線を仮定し求めたものである。なお、これらは地盤の非排水せん断強度を $c_u = 25[\text{kPa}]$ と統一して計算を行った。図5を見ると、剛塑性有限要素法の結果の方が、円弧すべり法の結果よりも常に小さい安全率を求めていることが分かる。これらの計算は両方とも上界計算であるので、正解値に上から近づく性質から、最小の安全率を算出している剛塑性有限要素法の方が、正解値に近く、精度の良いことが分かる。これによって剛塑性有限要素法の有用性が示された。

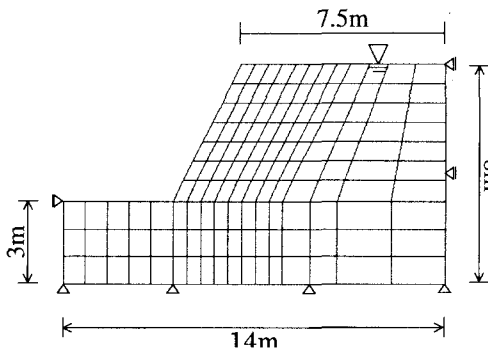


図3 斜面勾配 60° のメッシュ

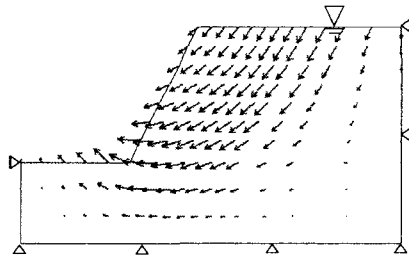


図4 斜面勾配 60° の速度場

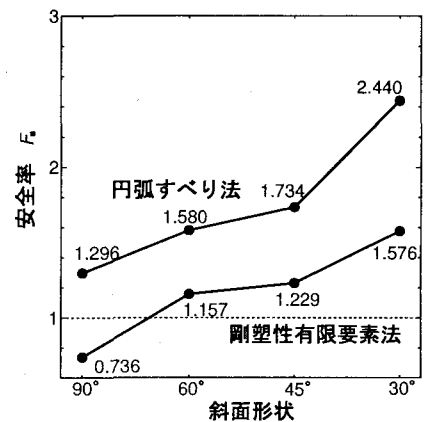


図5 斜面勾配と安全率の関係

5 結論

塑性加工の分野で開発された剛塑性有限要素法が地盤工学の分野でも適用でき、従来の地盤の安定計算との比較により、その有用性が確認できた。これによって、これまでの土質力学では細分化されていた地盤の安定問題が、1つの枠組みで説明できることが可能となった。

なお、これまでに行った地盤の安定解析では、地盤内をすべて「等方・均質」と仮定して計算を行った。実際には、地盤は土被り圧に応じて深さ方向に「不均質」に強度が分布している。また、自然堆積地盤は一般に「異方性」を示すので、これらの影響を考慮した地盤の安定問題についても検討していかなければならない。

参考文献

- 1) 浅岡顕：落着かぬ大地、地盤工学入門、(社)地盤工学会、2000。
- 2) 沖見芳秀・右近八郎・吉清孝：剛塑性有限要素法による支持力解析におけるモデル化について、第44回土木学会年次学術講演会講演概要集、III, pp.966~967, 1989。
- 3) 小高猛司：有限要素法の基礎と地盤への応用、8. 地盤工学における剛塑性有限要素法 (その1)、(社)地盤工学会、Vol.49, No.11, No.526, pp.33-38, 2001。
- 4) 山口柏樹：土質力学、技報堂、pp.207-208, 1998