

複合降伏モデルによる節理性岩盤の基礎掘削における解析的検討

中電技術コンサルタント(株) 正会員 ○岩田 直樹
 サンコーコンサルタント(株) 正会員 佐々木 猛
 埼玉大学 工学部 正会員 吉中 龍之進

1. はじめに

岩盤掘削において掘削面の鉛直応力は除荷、せん断応力は载荷となり同時に異なる応力経路が存在する。また、岩盤の応力-ひずみ関係は一般に非線形性を示すが、これは主として岩盤内に存在する節理群の変形特性に起因している。本研究では、岩盤不連続面の载荷-除荷過程における変形特性のモデル化を行い、これらを母岩と不連続面の特性を個別に考慮した複合降伏モデルに導入し、基礎掘削問題に適用してその有効性を検討した。

2. 理論の概要

複合降伏モデルは有限要素法による等価連続体解析の一種であり、有限要素法の構成則に弾性コンプライアンス理論を適用したものである。複合降伏モデルでは、式(1)に示すように、岩盤の総ひずみ $[e_T]$ は母岩のひずみ $[e_R]$ と節理群のひずみ $[e_I]$ の和として表現されるものと仮定している。また、母岩と節理群の応力は等しく、節理群は周期的に存在し、かつそれらの体積が母岩に比較して無視できるものと仮定することにより、岩盤の総ひずみ $[e_T]$ は式(2)で表すことができる。

$$\{e_T\} = \sum \{e_I\} + \{e_R\} \quad (1) \quad \{e_T\} = [\sum [F_I] + [E]]^{-1} \cdot \{\sigma\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad (2)$$

ここで、 $[F_I]$ ：節理群のコンプライアンスマトリックス、 $[E]$ ：母岩の応力-ひずみマトリックス、 $\{\sigma\}$ ：応力ベクトル、 $[C]$ ：節理群と母岩のコンプライアンスマトリックスである。

また、不連続面の垂直方向の変形特性 K_n は式(3)に示す Bandis らの提案式、せん断方向の変形特性 K_s は式(4)に示す Kulhaway の提案式を用いる。

$$K_n = K_{ni} \left[1 - \frac{s_n}{V_m K_{ni} + s_n} \right]^{-2} \quad (3) \quad K_s = K_{si} (\sigma_n)^{nj} \left(1 - \frac{\tau \cdot R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (4)$$

ここに、 K_{ni} ：初期垂直剛性、 V_m ：最大閉合量、 σ_n ：垂直応力、 K_{si} ：初期せん断剛性、 τ_p ：せん断強度、 τ ：せん断応力、 nj 、 R_f ：係数である。

不連続面の垂直方向の繰返し载荷試験では、図-1 に示すように除荷過程で非線形性を示し、残留変形が生じる。任意の拘束圧 σ_{ni} における不連続面の閉合量 V_i を、式(5)の弾性変形 V_{ei} と塑性変形 V_{pi} の和で表し、弾性変形 V_{ei} は式(6)に示す最大併合量 V_m の双曲線関数で定義する²⁾。除荷時の変形特性は、この弾性変形 V_{ei} を Bandis の提案式に付加した。

$$V_i = V_{ei} + V_{pi} \quad (5) \quad V_{ei} = \left(1 - \frac{V_i}{V_m} \right)^2 V_i \quad (6)$$

不連続面のせん断方向の繰返し载荷試験においても、図-2 に示すように除荷過程で残留変形が生じる。垂直方向と同様に、任意の拘束圧 τ_i における不連続面のせん断変位 U_i を、式(7)の弾性変形 U_{ei} と塑性変形 U_{pi} の和で表し、弾性変形 U_{ei} は式(8)に示す破壊接近度 τ_i / τ_p の双曲線関数で定義する²⁾。なお、除荷経路の変形特性は、単純化のために線形とした。

$$U_i = U_{ei} + U_{pi} \quad (7) \quad U_{ei} = U_i \left(1 - \frac{\tau_i R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (8)$$

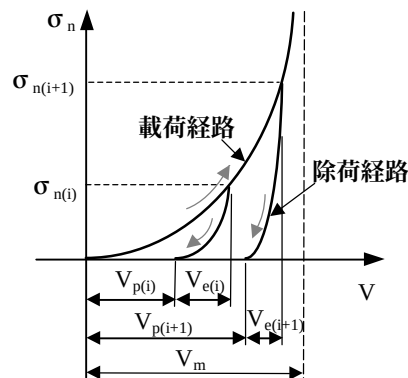


図-1 不連続面の垂直方向変形特性

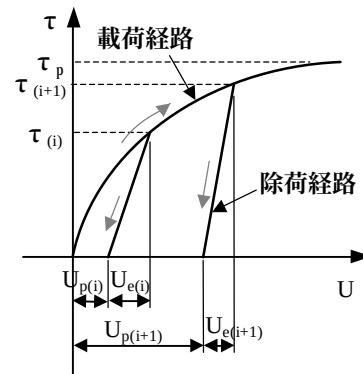


図-2 不連続面のせん断方向変形特性

(キーワード) 不連続面、繰返し载荷、掘削、有限要素法

(連絡先) 〒734-8510 広島市南区出汐 2-3-30 中電技術コンサルタント(株) TEL082-255-5501

3. 解析内容

不連続面のモデル化の違いによる影響を比較するために、不連続面を考慮しない弾性、除荷時も载荷経路を辿り残留変位を生じない場合、残留変位を考慮するが不連続面の K_n を直線とした場合、残留変位を考慮し K_n に Bandis の提案式による非線形性を考慮した場合の4ケースについて検討を行った。

図-3 に岩盤基礎の垂直掘削のモデルを示す。解析は、自重計算による初期応力解析後、深さ 20m の掘削部を7ステップに分けて掘削を行い、各ステップでは掘削解放力を100分割し作用させた。表-1 に解析用物性値を示す。岩盤は傾斜角 60° の1組の不連続面を持つモデルとした。

4. 解析結果

図-4 に不連続面の变形特性の違いによる掘削完了時の掘削壁面の変位を示す。弾性モデルでは、掘削解放力により背後に倒れ込むように変形し、変形モードも掘削底面付近で大きくはらみ出すような形となる。一方、不連続面を考慮した解析の変形モードは、いずれも掘削底面から直線的に倒れこむような水平変形を生じ、それに伴って鉛直方向には沈下が生じる。また、Bandis の提案式を用いたケースは、他のケースに比べ掘削底面より下側での水平変形は小さいが、掘削壁上端と下端の相対変位は他のモデルより大きくなる。これは、除荷時の非線形性を考慮したことにより、低応力部の剛性を小さく評価しているためだと考えられる。

図-5 及び図-6 に Bandis の提案式を用いたケースにおける掘削完了後の変形図及び最大主応力分布を示す。Bandis の提案式を用いたケースの変形は、他のケースに比べ掘削底面付近の盤膨れやはらみ出しが小さくなり、掘削底面から不連続面の傾斜角度で引いた線より前面でのみ変形が生じ、壁面のはらみ出しに伴って背後の地表面が沈下する。また、このときの最大主応力は掘削底面隅角部に集中し、分布領域は不連続面の方向に伸びている。

5. おわりに

不連続面の除荷時の残留変位と非線形性を考慮することにより、変形モードは実際の挙動とよく一致することがわかった。今後は、これらを用いて実際の問題を検証する予定である。

参考文献：1)佐々木猛，吉中龍之進，永井文男：有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究，土木学会論文集，No. 505/III-29，pp.59-68，1994．2)佐々木猛，吉田淳ほか：複合降伏モデルによる不連続性岩盤における平板载荷試験の解析的検討，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.189-194，2005年1月

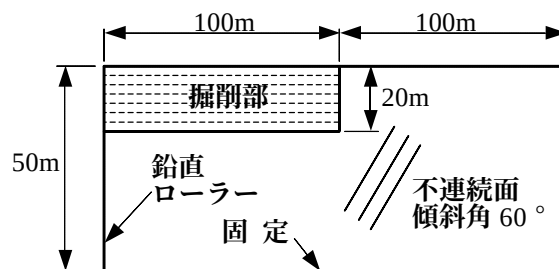


図-3 解析モデル

表-1 解析用物性値

母岩	単位体積重量 γ	25kN/m ³
	弾性係数 E	10GPa
	ポアソン比 ν	0.2
不連続面	初期垂直剛性 K_{ni}	1GN/m ³
	初期せん断剛性 K_{si}	10MN/m ³
	強度 ϕ, τ_o	$30^\circ, 1\text{MPa}$
	間隔 S	0.2m
	最大閉合量 V_m	0.5 mm
	傾斜角 θ	60°

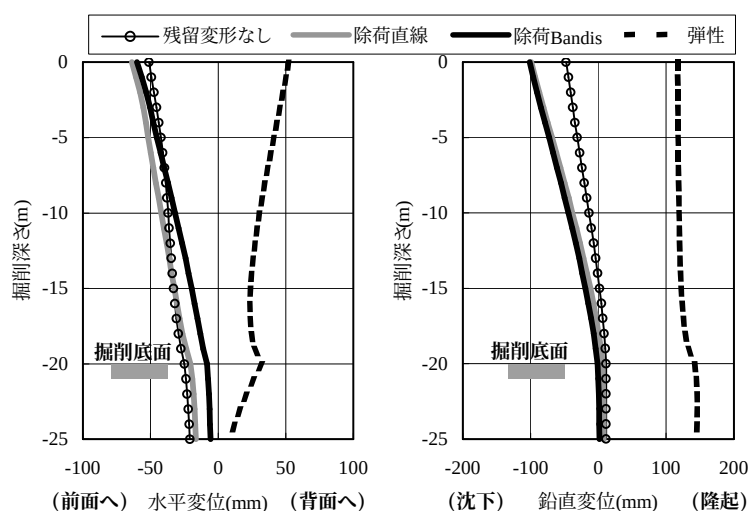


図-4 掘削壁の水平及び鉛直変位の比較

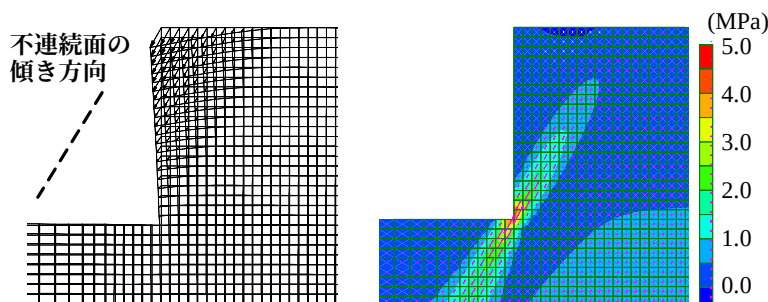


図-5 掘削壁の変形図
(傾斜角 60°)

図-6 最大主応力分布
(傾斜角 60°)