

Ⅲ-A206

損傷の進展を考慮した斜面安定解析結果とその考察

法政大学 学 浅井宏太

法政大学 正 草深守人

日本工営 正 白石保雄

1. まえがき

自然斜面や掘削・盛土斜面の崩壊は、地質材料中に存在する微視的欠陥（微小な空隙やクラック等）が初期条件や境界条件の変化に伴って発達し、やがては巨視的にみた滑り面を形成することにより生じるものと解釈する。斜面の崩壊がこのような力学的過程により発生するものと仮定できる場合は、斜面の安定解析に微視的欠陥の進展を考慮した損傷力学を適用することが出来る。本文は、岩盤斜面内部の微視的な潜在欠陥が掘削によって発達生長する過程を、損傷の進展を考慮した弾塑性問題として扱った数値計算例に基づき考察したものである。

2. 損傷の進展を考慮した構成方程式

材料内部の損傷は微視的構造の変化によって生じ、この微視的構造の変化は非可逆的であり変形の履歴に依存し、巨視的なレベルでは非弾性変形（ひずみ）挙動として観察される。連続体力学では材料の力学的性質を表現するために巨視的な変数である応力とひずみを関係付ける構成方程式を必要とするが、非弾性体の構成方程式では、これらの巨視的な変数に加えて変形履歴を表すことができる内部状態変数を必要とする。著者ら[1]は材料を等方性と仮定した場合について、主要な内部状態変数として等方性損傷 D （スカラー）を選ぶことにより、次式の等方硬化弾塑性構成方程式を与えた。

$$d\sigma_{ij} = \left\{ E_{ijkl}(1-D) - \frac{E_{ijtu}(1-D)}{h + \frac{\partial g}{\partial \sigma_{mn}} E_{mnpq}(1-D)} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{rs}} \right\} d\varepsilon_{kl} - E_{ijkl} \dot{D} \varepsilon_{kl}^e \quad (1)$$

$$h = \frac{\partial \bar{F}}{\partial Y} \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} E_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e - \frac{\partial g}{\partial D} \right) - \frac{1 - \sqrt{3}\alpha}{\sqrt{9\alpha^2 + 3/2}} \frac{\partial g}{\partial \bar{k}} \frac{d\bar{k}}{d\varepsilon_{eq}^p} \sqrt{\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}} \quad (2)$$

損傷モデルに対する塑性ポテンシャル g 、散逸ポテンシャル $\bar{F}$ 、ひずみエネルギー開放率 Y 、損傷速度 $\dot{D}$ は、Drucker-Prager の降伏関数 f を選びかつ関連流れ則（ $g=f$ ）を仮定した場合、それぞれ次式で定義される。

$$g = f = \frac{1}{1-D} \frac{\sqrt{3}J_{2D} - \alpha J_1 \sqrt{3}}{1 - \sqrt{3}\alpha} - \bar{k} \quad (3) \quad \bar{F} = f + \frac{Y^2}{2S(1-D)} H(\varepsilon_{eq}^p - \varepsilon_d^p) \quad (4)$$

$$Y = \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{1 - \sqrt{3}\alpha}{1 - \frac{\alpha J_1}{\sqrt{J_{2D}}}} \right)^2 (1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] \quad (5) \quad \dot{D} = \dot{\lambda} \frac{\partial \bar{F}}{\partial Y} \quad (6)$$

ここで、 $J_1(\sigma_H = J_1/3)$ と J_{2D} は応力の第一不変量と偏差応力の第二不変量、 σ_{eq} と ε_{eq}^p は Drucker-Prager の降伏関数に対する相当応力と相当塑性ひずみ、 ε_d は損傷の進展が始まる直前の相当塑性ひずみ、 S は損傷のエネルギー強度と呼ばれる材料定数である。また、 $\bar{k}$ と損傷の進展開始を表すステップ関数 H はそれぞれ次式で定義される。

$$\bar{k} = \frac{\sqrt{3}}{1 - \sqrt{3}\alpha} \left(\kappa + \frac{1 - \sqrt{3}\alpha}{\sqrt{3}} H' \int d\varepsilon_{eq}^p \right) \quad (7) \quad H(\varepsilon_{eq}^p - \varepsilon_d^p) \begin{cases} = 1 & \text{if } \varepsilon_{eq}^p \geq \varepsilon_d^p \\ = 0 & \text{if } \varepsilon_{eq}^p < \varepsilon_d^p \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 α と κ は Drucker-Prager の降伏関数に含まれる材料定数であり、 H' はひずみ硬化係数である。

[キーワード] 斜面安定、損傷、弾塑性、構成方程式、有限要素法

[連絡先] 〒184-0002 東京都小金井市梶野町 3-7-2 法政大学工学部

3. 損傷の進展を含む斜面の掘削解析結果

前章に述べた構成方程式を用いた損傷の進展を考慮した斜面の弾塑性掘削解析を実施した。図1～図7は、掘削に伴う損傷の進展状況を示したものである。斜面内部の損傷の進展は、掘削の初期段階から発生するものの、最終掘削に近づくまではそれほど際だった変化は見られない。しかしながら、最終掘削に近い6段目の掘削時点を境に急激な損傷の進展が始まり、7段目掘削では、掘削法尻部から崩壊が始まる結果となった。

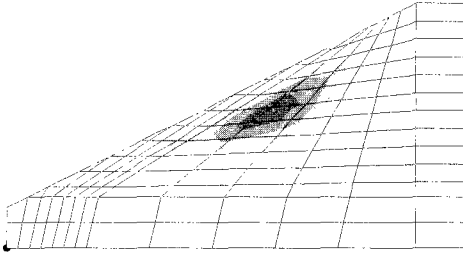


図1 損傷進展図（1段目掘削）

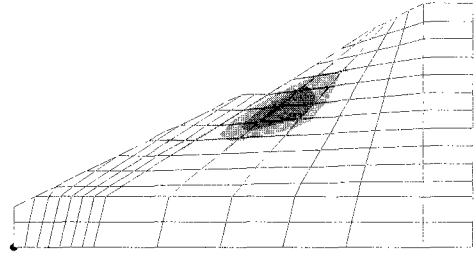


図4 損傷進展図（4段目掘削）

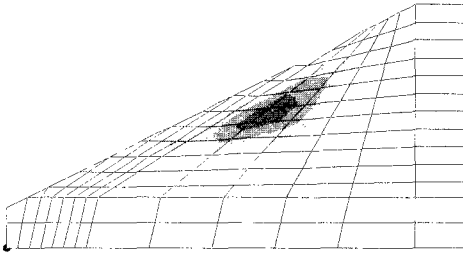


図2 損傷進展図（2段目掘削）

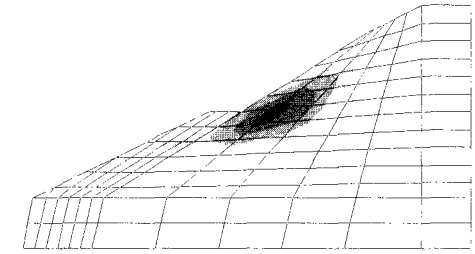


図5 損傷進展図（5段目掘削）

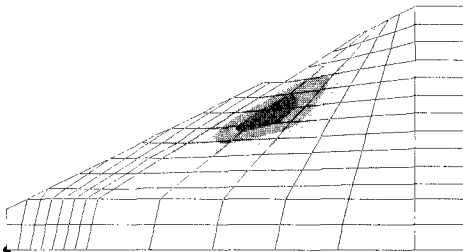


図3 損傷進展図（3段目掘削）

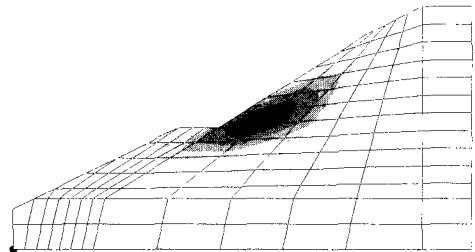


図6 損傷進展図（6段目掘削）

4. あとがき

斜面安定の評価方法の多くは、斜面内部の応力状態が、仮定した降伏基準に対して保有する余裕度を一つの尺度とした安全率を目安としてきた。この場合は、崩壊に至る応力経路が明らかでないことから、その精度が問題とされてきた。一方、損傷は地盤材料の破壊割合を直接表現する量であることから、斜面の安定性を評価する上で、今後有力な指標となるものと思われる。

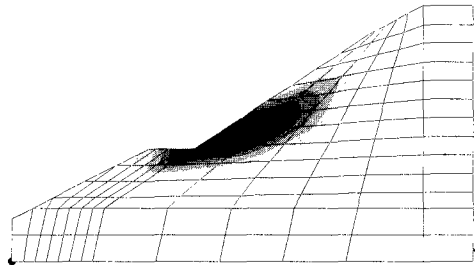


図7 損傷進展図（7段目掘削）

[1] 白石保律，草深守人，浅井宏太：損傷の進展を考慮した構成式と数値計算結果の考察，土木学会第53回年次学術講演会，第Ⅲ部門，1999.