

均質地盤を仮定した斜面の大変形解析

鳥取大学 木山 英郎 西村 強 長谷川隆志 福田 毅
川重工事 ○早乗 伴久 NEWJEC 脇本 公朋

1.はじめに

トンネル、地下空洞や斜面などの安定性を解析するとき、例えば、岩盤内の不連続面のような材料的な不整がどのような影響を与えるのか、あるいは、掘削や盛土等によって地盤に与える幾何学的な不整がどのような影響を与えるのか、と言った点が興味の対象となることが多い。当然、地盤を対象とする場合、両方の因子を考慮しなければならないことは言うまでもない。本文で報告する解析例は、後者に相当するものである。図-1の均質を仮定した地盤において、陰影部を掘削して斜面を形成した時、地盤にどのような変形が生じるか示した解析例である。解析は、著者らが既に報告している流動要素法(FLEM)¹⁾にひずみ軟化を考慮した構成式を導入して行った。特に、せん断ひずみ分布や、各要素重心の変位ベクトルの特徴についてまとめた。

2.流動要素法の概要

FLEM は、時刻 t での運動方程式を時間増分 Δt について差分近似し、未知数を陽な形で近似する逐次解法を用いている。

$$\{M\}\{^t\ddot{u}\}=\{^tR\}-\{^{t-\Delta t}F\}-\{\eta\}\{^{t-\Delta t}\dot{u}\} \quad (1)$$

ここに、 $\{^tR\}$:時刻 t での外力ベクトル、 $\{^{t-\Delta t}F\}$:時刻 t での内部等価節点力ベクトル、 $\{M\}$:質量マトリックス、 $\{^t\ddot{u}\}$:時刻 t の加速度ベクトル、 $\{\eta\}$:減衰マトリックス、 $\{^{t-\Delta t}\dot{u}\}$:時刻 $t-\Delta t$ の速度ベクトル
内部の等価節点力 $\{^tF\}$ は以下に示す式から求められる。まず、増分ひずみ $\{\Delta\varepsilon\}$ は、変位・ひずみマトリックス $[B]$ と増分変位ベクトル $\{\Delta u\}=\{^tu\}-\{^{t-\Delta t}u\}$ から次のようになる。

$$\{\Delta\varepsilon\}=[B]\{\Delta u\} \quad (2)$$

本研究では、Drucker-Prager 型降伏条件式と関連流動則により、増分形の構成式を導入している。また、時刻 t において要素内応力が塑性状態に達したとき、次のように定義される係数 r を用いて、応力の増分値は降伏曲面 $f=0$ を満足するよう修正する過程を設けている。

$$r=(^t\sigma_e-\sigma_Y)/(^t\sigma_e-^{t-\Delta t}\sigma) \quad (3) \quad \Delta^t\sigma=(1-r)\Delta^t\sigma_e \quad (4)$$

ここに、 σ_e :応力の弾性成分、 σ_Y :降伏応力。節点力および応力は次のように更新する。

$$\{^tF\}=\{^{t-\Delta t}F\}+\int_V[B]\{\Delta^t\sigma\}d(vol) \quad (5) \quad \{^t\sigma\}=\{^{t-\Delta t}\sigma\}+\{\Delta^t\sigma\} \quad (6)$$

式(1)より、時刻 t における加速度ベクトルが求めれば、これを時間増分 Δt について積分し、変位増分ベクトル $\{\Delta u\}$ と速度ベクトル $\{\dot{u}\}$ を求め、(1)~(6)により、節点力および応力が更新される。この過程を繰り返せば与えられた条件のもとで変形が表現される。また、ひずみ軟化の過程として、降伏曲面を支配するパラメータの一つである粘着力に注目し、粘着力を劣化させることで降伏曲面の収縮することにした。その関係式を次式で与える。

$$c'=f(c,\varepsilon^*)=c-k\varepsilon^* \quad (7)$$

ここに、 c' は劣化後の粘着力、 ε^* は相当塑性ひずみで

$$\varepsilon^*=\sqrt{2}\{(\varepsilon_{ij})_p(\varepsilon_{ij})_p\}/\sqrt{3}=d\varepsilon_p \quad (8)$$

3.解析モデルの設定

均質を仮定した地盤において、図-1の陰影部を掘削して斜面を形成したとき、どのような変形が生じるか解析する。解析は、平面ひずみ条件のもとで、初期地盤内応力を求めた後、瞬時掘削に相当する力を掘削面上節点に与えるものである。地盤に与えた定数は、ヤング率 $E=6\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、密度 $\rho=2.0(t/m^3)$ 、粘着力 $c=18\text{kPa}$ 、内部摩擦角 $\phi=15^\circ$ である。また、時間増分 Δt は 0.0002sec とした。この解析では、特に斜面部以下の地盤厚さ D を図中のように変化させて変形への影響も示すことにする。

4.解析結果

図-2 に要素内積分点のせん断ひずみの平均値を用いて、 D/H ごとにせん断ひずみ分布を示した。これらの図は式(7)において $\kappa=15$ 、粘着力の下限値を $c'=11.7\text{ kPa}$ とした時の最終状態である。図中には簡便分割法による臨界円を併せて示した。求められた安全率は(a)は 1.04、(b)は 1.04、(c)は 1.13 である。いずれの例でも法尻に大きなせん断ひずみが生じており、また臨界円よりやや斜面奥側にせん断ひずみが集中する傾向が見られる。各図のせん断ひずみの最大値を示すと(a)は 1.48、(b)は 1.93、(c)は 1.69 となっている。図-3 に各要素重心位置の変位ベクトルを示した。これは節点変位より補間したものである。この図を見れば法肩部では掘削面とほぼ平行な方向となっているが、法尻部では、掘削面法線方向に近づく様子がわかる。A 点(図-2)の変位量は(a)は 8.23m、(b)は 9.25m、(c)は 6.17m と、かなり大きな変形が表現されている。

(参考文献) 1) 木山 英郎, 藤村 尚, 西村 強: 連続体の大変形解析のための流動要素法(FLEM)の提案、土木学会論文集 No.439/Ⅲ-17, pp.66-68, 1991.12

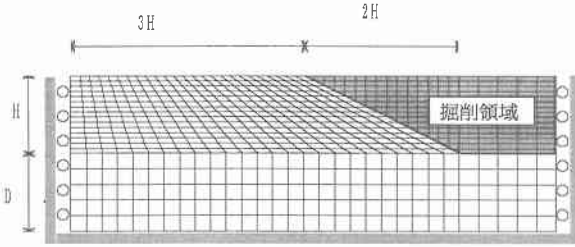
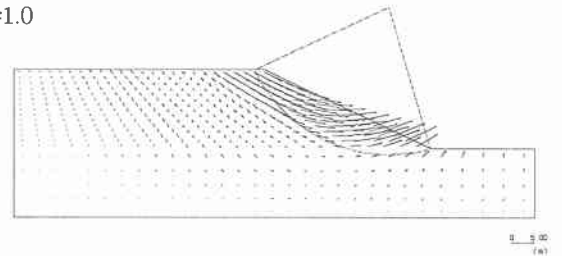
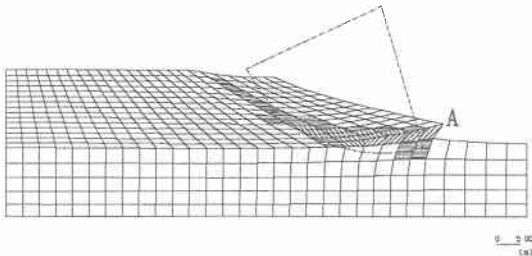


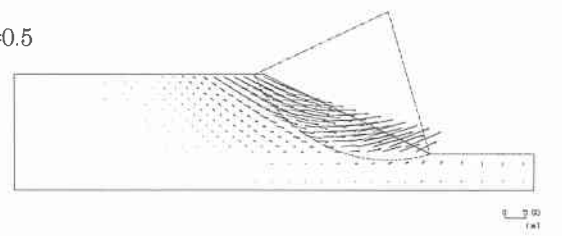
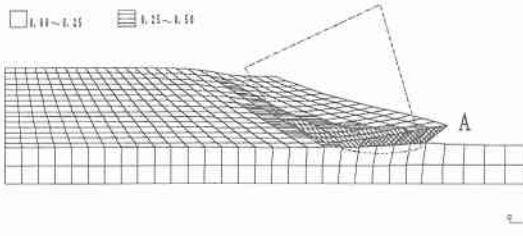
図-1 解析モデル

設定条件
 $H=20\text{m}$
 $D/H=1.0, 0.5, 0.$

(a) $D/H=1.0$



(b) $D/H=0.5$



(c) $D/H=0$

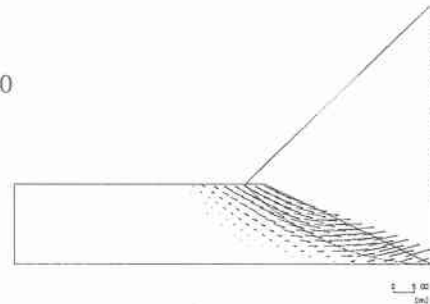
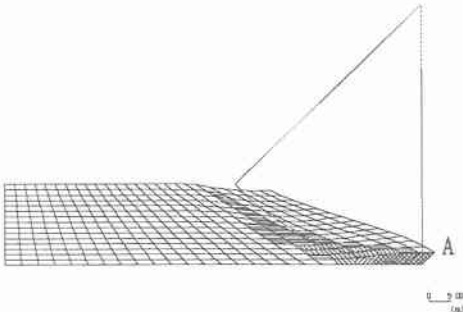


図-2 せん断ひずみ分布図

図-3 変位ベクトル図