

III-296 不連続変形法(DDA)によるトンネルを含む岩盤斜面モデルの解析

京都大学工学部 正会員 大西有三、山向 薫
鹿島建設(株) 正会員 佐々木猛、永井文男

1. はじめに

不連続変形法(DDA)は、G.H.Shi(1984)¹⁾によって開発された。本手法は、任意の弾性体の多角形で構成されるブロック相互の運動を動的、準静的に解析することができる。DDAは基本的に、弾性力学の中でFEMのハイブリッド変位型モデル(鷲津、1972)の範疇に分類される。これは、川井(1980)が提案したEBSM(Elastic Body Spring Model)と同等のものである。G.H.Shiは、DDAの非線形の釣り合い方程式にブロック間の貫入によるポテンシャルエネルギーを最小二乗法で評価する制約条件を設け、これを最小にするようにペナルティ法を導入する手法を開発した。この手法を用いることにより、ブロック間の貫入量を一定の誤差範囲以内に収める解が能率よく求められる。著者らは、DDAの岩盤工学への適用性を検討するため、これらにDrucker-Pragerの弾塑性構成則と表面の摩擦特性にMohr-Culomb則をあたえた。異なる走向/傾斜の節理群が存在する斜面付近にトンネルがあるモデルについて解析し、ブロック表面の摩擦特性の影響を検討した。

2. DDA解析理論の概要¹⁾

DDAの定式化はFEMと同様の手順を踏む。ただし、未知数は、要素の剛体変位、剛体回転、ひずみである。要素の剛性は、ひずみエネルギーを最小化することによって得られる。ブロック間の接触は、ブロックの辺と隅角が接した場合、辺に垂直な法線方向バネと辺に平行なせん断バネが設定される。この接触マトリックスは、貫入による最小二乗ひずみエネルギーをペナルティ法により貫入量が一定量以下になるように繰り返し解かれる。ここでは、順解析の場合についてその概要を述べる。

2.1 未知数と要素形状関数

ブロック内の応力とひずみが一定であると仮定すれば、2次元の場合、未知数は(1)式で表される。

$$\{D_i\} = \{u_0 \ v_0 \ \gamma_0 \ \epsilon_x \ \epsilon_y \ \gamma_{xy}\}^T \quad \text{-----}(1)$$

ここに、 u_0 、 v_0 ：剛体変位、 γ_0 ：剛体回転であり、回転中心ではスピンの角度である。 ϵ_x 、 ϵ_y 、 γ_{xy} ：軸およびせん断ひずみである。ブロック内の変位 u 、 v を座標 x 、 y の関数として(2)式で表す。これは、FEMの

$$u = a_1 + a_2x + a_3y, \quad v = b_1 + b_2x + b_3y \quad \text{-----}(2)$$

三角形ひずみ一定要素と同等である。(1)式の未知数を(2)式で表すと(3)、(4)式の関係になる。

$$u_0 = a_1 + a_2x_0 + a_3y_0, \quad v_0 = b_1 + b_2x_0 + b_3y_0, \quad \gamma_0 = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) = \frac{1}{2}(b_2 - a_3) \quad \text{-----}(3)$$

ここに x_0 、 y_0 は剛体変位をもとめる点の座標であり、一般にはブロックの重心である。

$$\epsilon_x = \frac{1}{2}\frac{\partial u}{\partial x} = a_2, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = b_3, \quad \frac{1}{2}\gamma_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) = \frac{1}{2}(b_2 + a_3) \quad \text{-----}(4)$$

2.2 要素のひずみエネルギーと剛性マトリックス

要素のひずみエネルギーはFEMと同様に2次元平面ひずみ仮定の場合、(5)式で表される。

$$\Pi_e = \iint \frac{1}{2}(\epsilon_x \sigma_x + \epsilon_y \sigma_y + \gamma_{xy} \tau_{xy}) dxdy = \iint \frac{1}{2}\{\epsilon_i\}^T \{\sigma_i\} dxdy = \frac{1}{2}\{\epsilon_i\}^T [E] \{\epsilon_i\} dxdy = \frac{S}{2}\{\epsilon_0\}^T [E_0] \{D_i\} \quad (5)$$

ここに、 $[E]$ ：応力-ひずみマトリックス、 $\{\epsilon_i\}$ ：ひずみベクトル、 $\{\sigma_i\}$ ：応力ベクトルである。

ブロックの剛性マトリックス $[k_{ij}]$ は(6)式のポテンシャルエネルギーを最小化することによって得られる。

2.3 ブロックの運動と釣り合い方程式

ブロックの運動は、ブロック間の貫入量 d による最小自乗的なエネルギーを最小化することによって得られる。これらの操作を全ブロックについて行い、要素合成 $[K_e]$ 、ペナルティ $[K_A]$ 、慣性力 $[K\alpha]$ 、点の拘束 $[K_{pp}]$ 、未知数 $\{D\}$ 、左辺の外力ベクトルとして、初期応力 $\{F_{\sigma 0}\}$ 、点荷重 $\{F_p\}$ 、物体力ベクトル $\{F_b\}$ 、慣性力 $\{F_a\}$ 、接触力 $\{F_N\}$ を求める。これらを全て重ね合わせて(6)式のブロック全体の釣り合い方程式が得られる。

$$([K_e] + [K_\lambda] + [K_\alpha] + [K_{pp}])\{D\} = (\{F_{\sigma_0}\} + \{F_p\} + \{F_b\} + \{F_d\} + \{F_\lambda\}) \quad (6)$$

全体釣り合い方程式(6)は、適当な時間ステップ Δ で(7)式の連立方程式を解くことによって得られる。

$$[K^i]\{\Delta D^i\} = (\{F^i\} + \{F_\lambda\}), \quad \{\Delta D^i\} = [K^i]^{-1}(\{F^i\} + \{F_\lambda\}), \quad \{D\} = \Sigma\{\Delta D^i\} \quad (7)$$

ただし、各時間ステップで貫入量 d がある一定値以下の制約条件で解くために、収束計算が必要である。解の数値的安定性は、剛体変位に対して慣性力マトリックス $[K_\alpha]$ が時間刻みの $1/\Delta^2$ に比例するため、時間刻み Δ を小さくすることにより得られる。

3. 解析モデルおよび結果の考察

著者らは、異なる節理群の組合せを有する岩盤斜面付近のトンネルの安定性をみるため、本手法にDrucker-Pragerの関連流れ則による弾塑性構成則を導入しその適用性を検討した。解析モデルとして異なる走行/傾斜の節理群の組合せを想定したモデルの検討を行った。ブロックの接触機構としてMohr-Coulombの摩擦則を採用した。ブロック間の法線方向の接触力 $R_n > 0$ 、および法線直角方向の接触力 $R_s < \sigma_n \tan \phi + C$ の場合その方向の接触の連成バネが作用する。これらの特性を図-1~4に示す。ここでは、ブロックの貫入に対するペナルティを接触の法線方向のみ与え、せん断方向には、図-4の変形特性を与え解の収束と安定性を図った。図-5~7に解析モデルと結果を示す。図-6は、ブロック表面の摩擦特性 $c=0$ 、 $\phi=0^\circ$ でブロック内部が弾性的の場合である。図-7は、ブロック表面の摩擦特性 $c=0$ 、 $\phi=40^\circ$ でブロック内部が弾塑性(図-5に示す強度を用いている)の場合である。トンネル部から法尻にかけて塑性領域が繋がっている。これらの傾向は、与える強度特性によって異なる。実験や解析などによって工学的な意味と対応する定数を検討する必要がある。特にブロック表面の摩擦特性とせん断バネがその結果に大きく影響している。

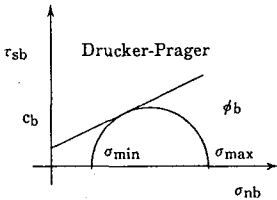


図-1 内部の強度特性

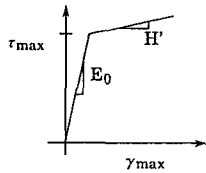


図-2 内部の変形特性

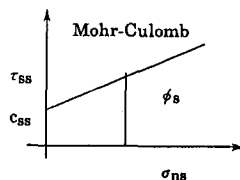


図-3 表面の強度特性

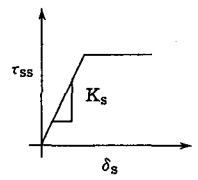


図-4 表面の変形特性

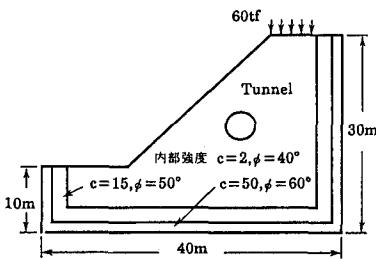


図-5 解析モデルおよび領域

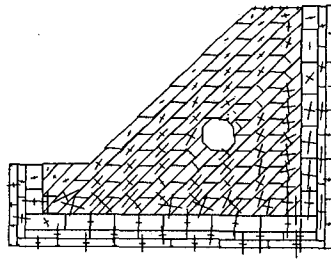


図-6 ケース1(弾性、 $c=0, \phi=0^\circ$)

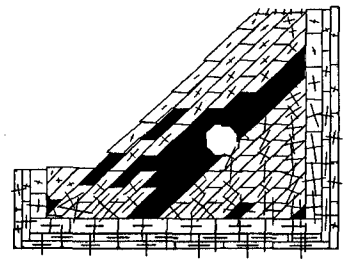


図-7 ケース2(弾塑性、 $c=0, \phi=40^\circ$)

4. むすび

本報告では、DDAの岩盤工学への適用について、その実用性を確かめるため若干の検討を行った。それらは、FEMとDEMの中間的な結果が得られた。構成則、接触機構、ロックボルトなどの力学モデルはFEMと同様の発展性がある。また、ブロックの接触機構の設定が解の収束および安定性に大きく影響する。

参考文献

- 1) G.H.Shi "Block system modeling by Discontinuous Deformation Analysis", Univ. of California, Berkeley, Dept. of Civil Eng. August, 1989