

III-423

個別要素法の不連続性岩盤への適用

(株) 大林組

正会員○木梨 秀雄

〃

正会員 畑 浩二

〃

正会員 吉岡 尚也

〃

正会員 藤原 紀夫

1. はじめに

岩盤の力学的および水理学的挙動を解析する上で、き裂の幾何学的配置や力学的特性をいかに考慮するかは、岩盤力学の重要な課題となっている。これらのき裂の特性を数値解析に取り込むものとしては、クラックテンソル¹⁾などの岩盤を等価な連続体に置き換える手法や、個別要素法²⁾（以下DEMと記す）などの岩盤を不連続体とする手法がある。著者らは、不連続性岩盤の挙動を解析するために、DEMの適用性を検討してきた。本報告では、重力場における不連続性岩盤内のトンネル掘削を模擬した底面摩擦模型実験およびDEM解析の結果を比較し、DEMの適用性と入力定数の設定方法について述べる。

2. 底面摩擦模型実験

底面摩擦模型実験³⁾は、これまで重力場における不連続性岩盤内のトンネル掘削時の挙動や、斜面崩壊等のシミュレーションに活用されてきた。本研究では、角砂糖を用い、重力場における円形トンネル掘削時の挙動を模擬した。実験は、角砂糖（一辺が1.5cmの立方体）を縦に33個、横に25個を格子状および千鳥状に配列し、空洞径を角砂糖の辺長に対し、3・5・7・10倍に設定して行った。また、掘削前に最下面に作用する荷重を基準に、側圧比は0・0.25・0.5・0.75・1.0とした。トンネル部分には、木製の円板を取り付けておき、側圧を作用させ底面の砂紙ベルトを1mm/secの定速で回転させた。その後、木製の円板を取りはずすことにより、トンネル掘削時の挙動を模擬した。

格子状配列で側圧が0、空洞径が15cmの場合の実験結果を図-1に示す。このほかの空洞径の場合も、空洞の天端より上の角砂糖がすべて崩落した。側圧比が0.25の場合を図-2に示す。側圧の作用により天端部分に梁形成効果が現れ、角砂糖の変位や崩落する領域は側圧の増大とともに小さくなった。また、角砂糖が下方に移動した後静止し、空洞から離れた位置で角砂糖間に隙間ができた。一方、千鳥状配列の場合は、図-3のように側圧が0でも、天端部分の限られた領域が崩落するのみであった。この領域は空洞径に伴って大きくなった。側圧を作用させた場合は、拘束されないブロックのみが崩落した。

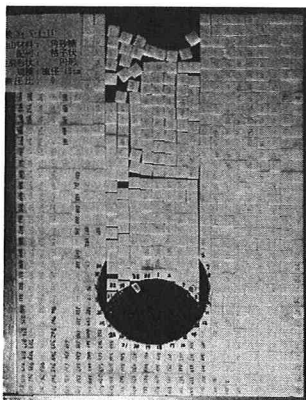


図-1 格子状配列
側圧0・空洞径15cm

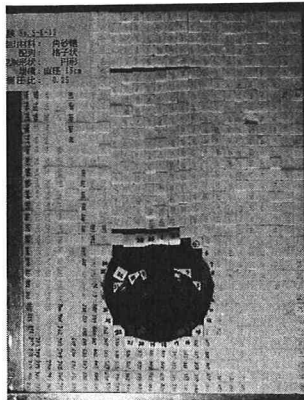


図-2 格子状配列
側圧比0.25・空洞径15cm

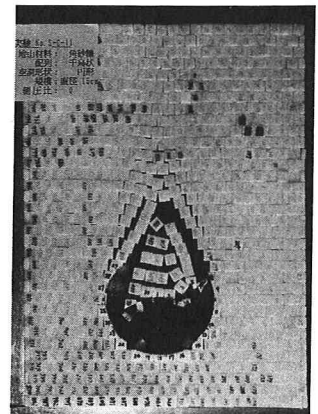


図-3 千鳥状配列
側圧0・空洞径15cm

3. DEM解析

DEM解析コードUDECにより、底面摩擦模型実験と同じ幾何学条件を用いた解析を行った。角砂糖に相当するブロックは剛体とし、き裂は垂直とせん断ばね、およびスライダーでモデル化した。き裂の摩擦角は、角砂糖の傾斜試験より 35° とした。木山ら⁴⁾が指摘するように、き裂の剛性 K および粘性 η と解析の時間増分 Δt の組み合わせは、運動方程式を差分近似する際の解の収束性や安定性を左右する。Cundall⁵⁾はブロックの質量 m とき裂の剛性 K から、次式を提案している。

$$\Delta t < 2\sqrt{m/K} \quad (1)$$

$$\eta = \sqrt{mK} \quad (2)$$

式(1)より、き裂の剛性は Δt を支配し解析時間に影響を及ぼす。本研究では、垂直およびせん断ばねの剛性 K_n 、 K_s を $10^5 \sim 10^{11}$ Pa/mの各オーダーについて解析を試行し、 $K_n = 5 \times 10^8$ Pa/m、 $K_s = 1 \times 10^8$ Pa/mとした。解析では予め重力を作用させ、微小振動が減衰した後に掘削を模擬した。格子状配列で側圧0、空洞径15cmの場合の解析結果を図-4に示す。この結果、底面摩擦模型実験とはほぼ同様の崩落挙動が解析された。このとき、 $\Delta t = 1.7 \times 10^{-6}$ secで、解析時間は約50minであった。拘束圧を作用させた場合は、さらに短時間でブロックは安定する。また、図-5に千鳥状配列の解析結果を示す。

原位置岩盤の K_n 、 K_s は、通常実験により求める。Bandisら⁶⁾の研究によると、き裂の K_n 、 K_s は垂直応力 σ_n に依存し、硬岩のき裂ではおよそ $10^9 \sim 10^{11}$ Pa/m程度の範囲にある。そこで、解析モデルの寸法を実規模に近いものとし、 $K_n = 10^{10}$ Pa/m、 $K_s = 5 \times 10^9$ Pa/mで解析を実施した。この場合、 $\Delta t = 7.6 \times 10^{-5}$ の条件で図-4と同様のブロックの崩落過程が解析できることを確認した。

4. まとめ

不連続性岩盤内のトンネルを対象とした底面摩擦模型実験の結果をDEMで解析し、その適用性や入力定数を検討した。その結果、DEMにより重力場におけるブロックの崩落挙動が解析できた。また、硬岩を対象としたき裂の垂直およびせん断剛性が $10^9 \sim 10^{11}$ Pa/m程度の場合にも、実用的に解析できることを確認できた。今後は、き裂に幾何学的配置や力学特性のモデル化を行い、空洞掘削に伴うき裂の開口やすべりに起因する岩盤のゆるみなどについて検討したい。

参考文献

- 1) Oda M.: Fabric tensor for Discontinuous Geological Materials. Soil & Foundations, Vol. 22, No. 4 pp. 96 - 108, 1982
- 2) Cundall P.A.: A Computer model for rock-mass behavior using interactive graphics for the input and output of geometrical data, A report for U. S. Army, 1974
- 3) Bray J.W., Goodman R.E.: The theory of base friction models, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, 1981
- 4) 木山英郎・藤村尚：カンドルの離散剛性要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析、土木学会論文報告集第333号, 1983
- 5) Cundall, P.A.: Rational Design of tunnel supports, Technical report MRD-2-74, U.S. Army Corps of Engineers, 1974
- 6) Bandis, C., Lumsden A. and Barton N.: Fundamentals of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20, 1983

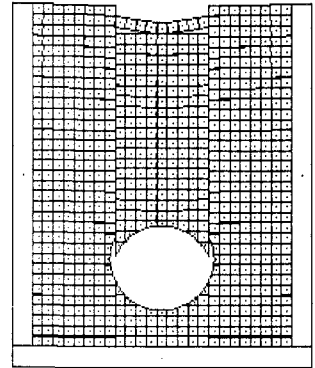


図-4 DEM解析結果（格子状配列）
側圧0・空洞径15cm

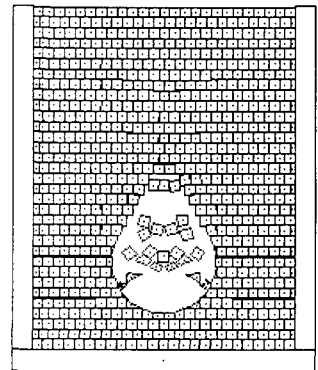


図-5 DEM解析結果（千鳥状配列）
側圧0・空洞径15cm