

(93) 損傷進展モデルによる不連続性岩盤の掘削解析

大成建設(株) 正会員 ○伊藤 文雄
インスブルック大学 Gunter SWOBODA

Excavation analysis of jointed rock mass by damage propagation model

Fumio ITO, Taisei Corporation
Gunter SWOBODA, University of Innsbruck

Engineers have observed that the rock adjacent to slopes, cuts and underground openings, and room and pillar underground mine systems exist in a jointed rock mass, nevertheless the rock structure comprising the surrounding rock and overburden mass remain stable. Rock mass can be considered as the material which has originally some regular joint sets. During the process of excavation, joint sets grow and interact, expanding the fracture regions. Therefore failure can occur.

In this paper we have applied a second order tensorial representation of damage and treat the joint set as a continuum phenomenon on a suitable scale. Our model can account for the progressive failure of damaging rock mass due to the growth of these joint sets. We shall call this failure damage propagation in the jointed rock mass. Based on this model, we developed FEM code which can show the orientation and length of damage propagation.

This study presents the application of damage propagation model to a excavation problem in order to study the mechanism of growth and interaction in a brittle rock mass by FEM. By using our model, it is clear to know where is the fracture region in the rock structures. With our model it is founded that pre-existing joints have a marked influence on the development of the failure surface in region of tensile and compressive stresses.

1. はじめに

岩盤特に硬岩中に空洞などを掘削施工する場合、岩盤挙動を支配する大きな部分は亀裂、不連続面の挙動であると考えられる。岩盤内空洞の掘削時に周辺岩盤をボアホールTVなどで観察した結果などでも掘削の進行に従って、閉じていたあるいはなかった亀裂が開き始めることが観察されている。水圧破碎の場合には亀裂内面が水圧によって押し広げられることによって亀裂は進展するが、空洞掘削などの場合では亀裂面には初期応力が解放されることによって圧縮力が作用しているにも関わらず亀裂が生成し開口することが異なる。このような圧縮荷重下での亀裂の進展を考慮し、亀裂の進展に伴うマクロな変形挙動を把握することが必要となる。

不連続性岩盤の解析モデルは、岩盤の不連続面を直接考慮して陽にモデル化し、不連続体として解析する方法と、不連続面を含む岩盤の力学特性を等価な連続体に置換えて岩盤をモデル化し、連続体として解析する方法とがある。しかし不連続性岩盤は、貫通した不連続面で構成される岩盤より、幾つかの貫通しない不連続面のセットで構成される岩盤の方が一般的であると考えられる。そして掘削等の外力が与えられることによって既存の不連続面に起因して初期亀裂の進展現象が生じ、岩盤の見かけの剛性が低下してゆく非線形挙動が多くの室内実験及びフィールドでの計測によって確認されている。このように亀裂進展というローカ

るな現象を、マクロな剛性低下結び付けた連続体理論とマイクロメカニクスを融合させたモデルを開発する必要がある。

本研究では、不連続面に起因した亀裂進展を考慮できる新しい連続体理論を構築し、亀裂を含む室内実験結果と比較検討を行い、さらに掘削解析を行うことによって地下深部の不連続性岩盤への適用性を議論したものである。

2. 熱力学法則に基づく二次元損傷進展モデル

亀裂進展モデルを損傷テンソルを局所状態を規定する内部変数（内部構造の変化を代表する変数）として、熱力学法則の枠内で以下のように構築する。すなわち与えられた弾性エネルギーは、不連続面に起因する材料内部の構造変化に消費されるエネルギーと材料内に蓄積される内部エネルギーから成ると考える。

材料中の不連続面を損傷テンソルで評価し、歪みと損傷テンソルよりなるHelmholzの自由エネルギーを設定する。そして状態変化を準静的過程とみなし、温度項を無視した熱力学法則を適用することによって、損傷弾性マトリックス、損傷進展を引き起こす熱力学的駆動力、移行方程式（損傷進展則）を算定することができる（図-1参照）

既に存在する不連続面の系に与える影響を損傷弾性マトリックスとして評価し、損傷ポテンシャルによる亀裂進展の判定後、損傷進展マトリックスと重ね合わせることによってマクロな材料の剛性低下として、有限要素法に組み込むことが可能となる [1] [2]。

損傷弾性マトリックスは、基質部のヤング率E、ポアソン比 ν 、亀裂の配置を表すL、Mで構成され、損傷進展マトリックスは、進展則を規定する V_0 、 q 、 r （三点曲げ試験より得られるR曲線のべき乗則近似のパラメータ）で構成される。またCsは不連続面の粗度を表すパラメータであり、1.0は摩擦抵抗が全くないことを示す。従って本解析の入力パラメータとしては以上の8つの入力定数が必要となる（表-1参照）。

表-1 入力定数

パラメータ	材 料 定 数
E	1000000 kN/m ²
ν	0.2
L	0.725
M	1.1
v_0	0.0004
q	0.005
r	0.5
Cs	1.0

3. 初期亀裂を有する一軸圧縮試験のシミュレーション

損傷進展モデルの妥当性を検証するため、名古屋大学で行われた初期亀裂を有する一軸圧縮試験のシミュレーションを行った。備試体は、モルタル打筋後に金属薄板群を挿入し、4時間後に引抜くことによって初期亀裂群が作成されたものである [3]。

実験結果（図-2参照）は、載荷と共に各々の初期亀裂から亀裂が進展し、非線形な挙動を示している。解析では、表-1に示すような入力定数を用いた。その結果を図-3に示す。

軸応力-軸歪み関係について解析結果と実験結果を比較すると、解析結果は初期亀裂の角度に応じて変化する非線形挙動をよく追跡している。（注：実験と解析の角度の定義が異なる）また亀裂進展状況としては、一軸圧縮応力下でも初期亀裂に起因してWingクラックが発生していることが実験でも明らかになっている。今回開発したモデルでは、亀裂（損傷）進展の方向と長さの両者を損傷テンソルの増分として表現できることにある。その結果を図-4に示す。応力-歪み関係のみならず進展状況も各々の載荷ステップごとの観察結果と良く一致している。

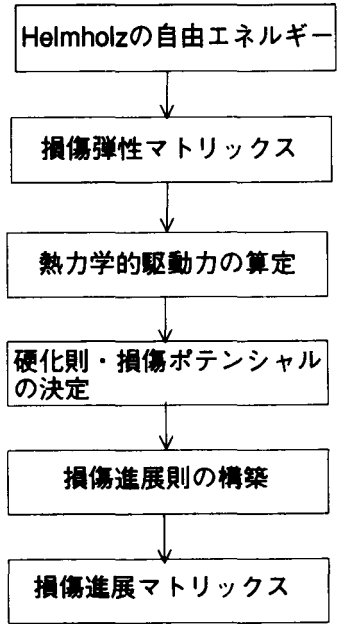


図-2 損傷進展モデルの構築フロー

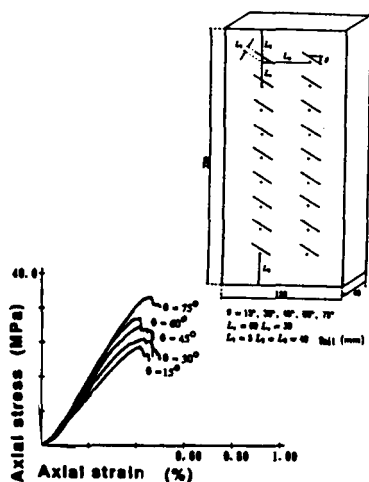


圖-3 實驗結果

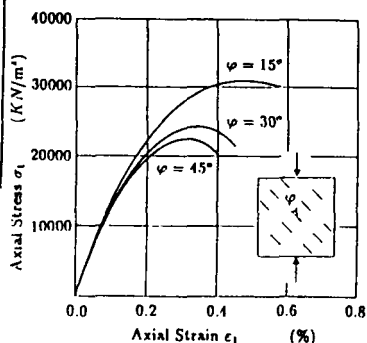


図-4 軸応力-軸歪み関係

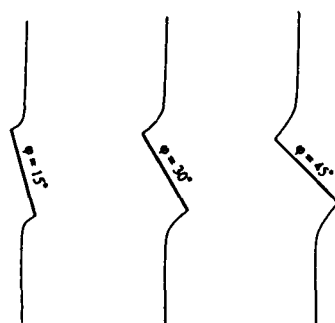


圖-5 損傷進展圖 (解析結果)

4. 初期亀裂を有するせん断破壊のシミュレーション

Stephansson [4] らは、初期亀裂を有する供試体をせん断箱に入れ亀裂進展のメカニズムを検討している。初期亀裂に起因した破壊は、まず初期亀裂端部に生じる引張歪みによって進展し、徐々に亀裂面上のせん断歪みが挙動を支配してゆくことが確認されている。亀裂進展を精度良く解析するためには、引張、せん断を同時に評価できるモデルの構築が期待されている。本研究で開発したモデルは、このせん断に起因する進展則を正確に評価できる点に特徴を持つ。図-5に地質生成過程でよく見られる不連続面のせん断破壊の状況を示している。図-6には、本モデルによる解析結果を示すが、両者とも進展モードは良く一致している。もちろんStephanssonらの実験結果とも一致している。

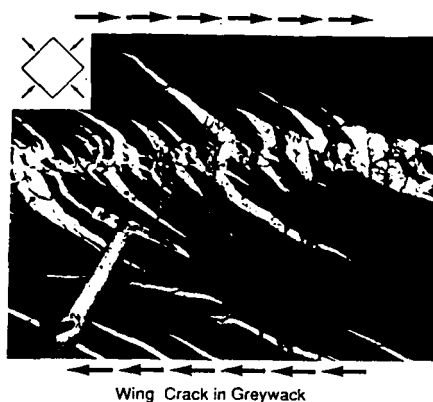


図-5 地質観察に見られるせん断破壊

5. 不連続性岩盤の掘削解析

前節まで引張とせん断に対して室内実験結果との比較を行ったが、本節では上記と同じ入力定数を用いて、掘削解析を行い、損傷進展モデルの適用性を検討した。

掘削モデルは、 $\Omega=0.1$ で45度方向に不連続面群を持つ岩盤中地下200mに内径5mの円孔を掘削する場合を想定した。

解析手法として、従来の等方性材料を仮定した完全弾塑性解析と損傷進展解析を行い、空洞周辺の塑性ゾーンとDamageゾーンの相違を比較・検討した。完全弾塑性解析において用いた c 、 ϕ は、500Mpa、40度である。また、初期応力としては、土被り荷重($\gamma=2.5\text{t/m}^3$)を側圧係数1.0の条件で設定した。

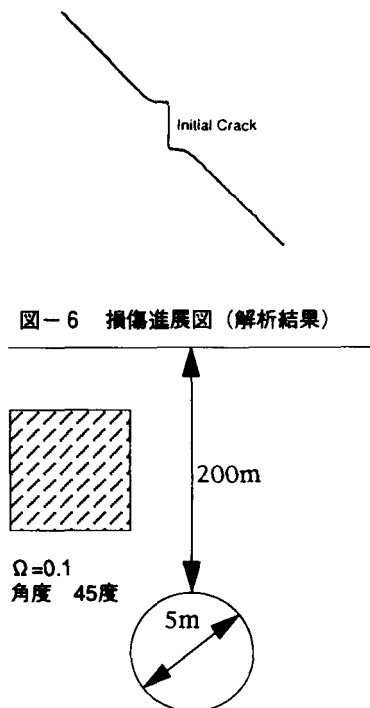
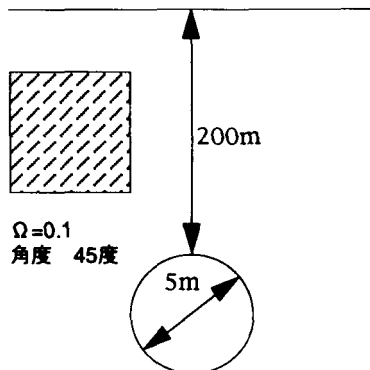


圖-6 損傷進展圖(解析結果)



図一 7 掘削モデル

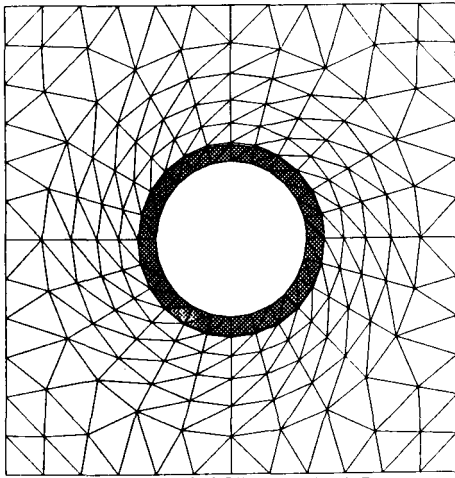


図-8 完全弾塑性解析結果

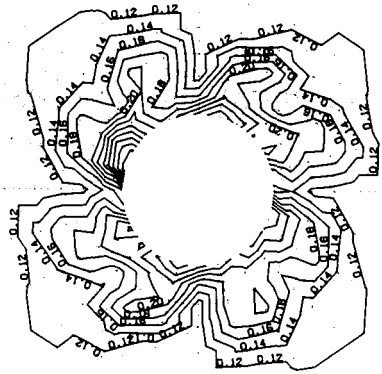


図-9 損傷進展解析結果

図-8には、掘削時の完全弾塑性解析結果の塑性ゾーンを、また図-9には、損傷進展モデルによるDamageゾーンを Ω （亀裂進展長）で示した。塑性ゾーンは、空洞周辺に一樣に分布しており、1mの塑性ゾーンが得られた。しかし、不連続面に起因した亀裂進展を考慮したDamageゾーンは、最大空洞径とほぼ同じ5m程度に45度方向に上下左右に分布しており、注目すべき点は、初期の $\Omega=0.1$ の亀裂が、空洞壁面ではなく、壁面から2m程度の所に $\Omega=0.2$ の最大進展長が得られた点にある。すなわち、45度方向に不連続面群を持つ岩盤中に掘削した場合、壁面のDamageゾーンより、岩盤内部にDamageゾーンの最大が発生していることを示している。従って空洞掘削時にこの点を充分考慮して、計測機器の配置や施工管理を行う必要があると考えられる。

6. おわりに

一般の亀裂進展則では、引張に起因したメカニズムは良く捕らえているが、せん断に起因する進展メカニズムも同時に追跡できるモデルは希有である[6]。しかし、実際の空洞掘削、また地下深部のボーリング孔周辺において、孔壁での引張破壊のみならず、左右孔壁に脆性的なせん断破壊領域が発達し、破壊に至る現象が観察されている[5]。このような空洞周辺の脆性破壊のメカニズムを評価できるモデルは、設計ツールとして大いに期待される。

本研究で開発した損傷進展解析により、任意の構造物に対して、初期亀裂の影響を考慮した亀裂進展による脆性破壊が追跡でき、岩盤構造物自体の安定性を精度良く評価できる。

今後開発した解析手法の妥当性を、実際の現場計測データに照らし合わせながら検証を進め、三次元モデルと共に設計手法へ反映させてゆく所存である。

7. References

- [1] Stumvoll, M., 'Numerical model for discontinuous rock mass considering damage propagation under non-propositional and compressive loading', Ph.D thesis, University of Innsbruck, Austria, 1991
- [2] Swoboda, G., Ito, F., 'Two dimensional damage failure propagation model of jointed rock mass', Proc. of Computational Mechanics edited by Valliappan, pp681-687, 1993
- [3] Seiki, T., Ichikawa, Y., Aydan, O., Ito, F., 'Mechanical behaviour and failure of rock masses having distributed sets of cracks of finite length', Proc. of Assessment and prevention of failure phenomena in rock engineering edited by Pasamehmetoglu, pp181-186, 1993
- [4] Savilahti, T., Nordlund, E., Stephansson, O., 'Shear box testing and modelling of joint bridges', Proc. of Rock Joints edited by Barton, N., pp295-300, 1990
- [5] Ewy, R. T., 'Deformation and fracture around cylindrical openings in rock', Ph.D thesis, University of California at Berkeley, U.S., 1989
- [6] Horii, H., Nemat-Nasser, S., 'Compression-induced micro-crack growth in brittle solids; axial splitting and shear failure', Journal of Geophysical Research, Vol.90, No. B4, pp3105-3125, 1985