

新規亀裂の発生・進展を考慮した岩盤構造物の 安定性評価について

Stability of rock structures considered generation and progress of new cracks

中川光雄*・蔣 宇静**

Mitsuo NAKAGAWA and Yujing JIANG

Large part of deformation and failure of rock masses are governed by both characteristics of geometrical distribution of discontinuities and those of mechanical behavior in a single discontinuity. It is thought that stability of rock structures extremely depend on not only existent discontinuities but also new cracks which are generated and progress due to loading or excavation. In this paper, the effects of rock support are investigated with the new approach, which is proposed for modeling generation and progress of cracks due to shear and tension failure in the matrix by using distinct element method, through the simulation of underground opening excavation. The applicability of the approach are verified by means of comparison with plastic failure model for intact.

Key Words: discontinuous rock mass, cracking, rock support, enhanced distinct element method(EDM)

1. はじめに

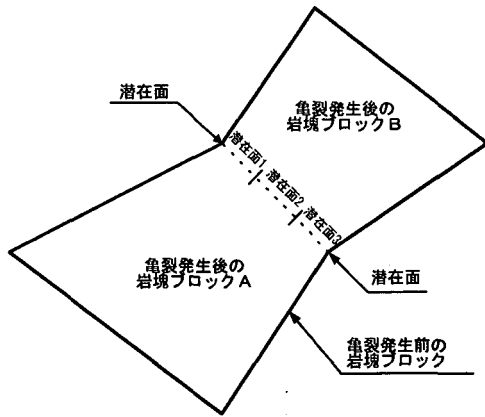
大規模地下空洞などの岩盤構造物の安定性を数値解析により評価する場合、連続体微小変形理論に基づいた有限要素法などが利用されることが多い。しかし、岩盤構造の安定・不安定の判断、不安定であった場合の不安定現象の把握、合理的な支保設計などに対しては、降伏あるいは破壊後も含めた岩盤の挙動特性が十分に表現できる力学モデルや解析手法の適用が望まれる。このため、最近では個別要素法(DEM)などにより既存不連続面の変形挙動や破壊現象を直接モデル化する手法の適用も見られるようになった¹⁾。著者らは先に、個別要素法を用い、既存不連続面の変形・破壊現象のみならず、岩石基質部で新たな亀裂が発生し進展する現象も同時に表現できるモデル化・解析手法を提案している²⁾。本研究では、大規模地下空洞の掘削を例としてPSアンカーや吹付けコンクリートなどの支保による効果を評価するにあたり著者らが提案しているモデル化・解析手法を適用した場合の有効性を検討する。このため、岩石基質部での破壊後特性の取り扱いが異なる場合(弾塑性体および新規の亀裂発生を考慮)のそれぞれから得られた破壊現象や支保効果を比較して、支保設計において著者らの解析手法を適用することの意義を考察する。

2. 個別要素法による亀裂発生・進展のモデル化の概要

個別要素法は、岩盤不連続面を個々の岩塊ブロックの境界面として、同時に、個々の岩塊ブロックを岩盤不連続面に囲まれた岩石基質部として表現する代表的な不連続体解析手法の1つである。中川ら²⁾は、潜在的に発生する亀裂をその発生が予測される位置にその大きさの岩塊ブロック境界(潜在面)として予め定義しておく拡張個別要素法を提案した。また、解析手法の実用性を検証するために室内模型実験の結果と比較し、さらに、潜在面を客観的に定義する方法を提案している³⁾。ここで、図-1において破線で表示した位置は個別要素法の立場から見ると隣接している岩塊ブロックA、B相互の境界であるが、これを潜在面として定義する。亀裂が発生するまではこの境界は仮想的であり連続した岩石基質部であることを表現するために、周囲の岩石基質部と等価な剛性と強度を与える。そして、亀裂の発生条件により亀裂発生と判定された時、この剛性と強度は、自動的に岩盤不連続面の値として処理することで物理的な亀裂の発生を表現する。この例では、独立した3つの潜在面が直列して定義されており、例えば潜在面1が亀裂発生条件により

* 正会員 博(工) ㈱CRC総合研究所 建設システム事業部

** 正会員 博(工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科



亀裂発生前：岩塊ブロックは太線で示した1つであり、内部は連続性が維持される、
 亀裂発生時：3つの潜在面が順次顕在化して岩盤不連続面となり、岩塊ブロックはAとBの2つに分離する。

図一1 潜在面の定義²⁾

表一 空洞周辺岩盤の物性値(岩石基質部)

ヤング係数	30.0 (GPa)
ポアソン比	0.17
密度	2.40 (g/cm ³)
粘着力	3.00 (MPa)
内部摩擦角	40.0 (°)
引張強度	3.50 (MPa)

表二 空洞周辺岩盤の物性値(既存の不連続面)

垂直剛性 (Kn)	1000.0 (GPa/m)
せん断剛性 (Ks)	0.8 (GPa/m)
粘着力 (c_j)	0.0 (MPa)
摩擦角 (ϕ_j)	30.0 (°)
引張強度 (σ_{tj})	0.0 (MPa)

亀裂発生と判定されたとしても他の2つの潜在面(潜在面2と潜在面3)は亀裂発生条件により亀裂発生と判定されない限り潜在面の状態が維持される。一旦亀裂として顕在化した潜在面は、それ以降滑りや剥離などの岩盤不連続面としての挙動が許容される。ここで述べた連続体から不連続体への移行過程では逐次的な応力再配分が誘起される。この過程で既に顕在化した亀裂の近傍に存在する別の潜在面において亀裂発生条件が満足された場合、これが新たな亀裂の発生となる。以上のような進行性のある潜在面の顕在化を本研究では亀裂の進展の表現と考える。

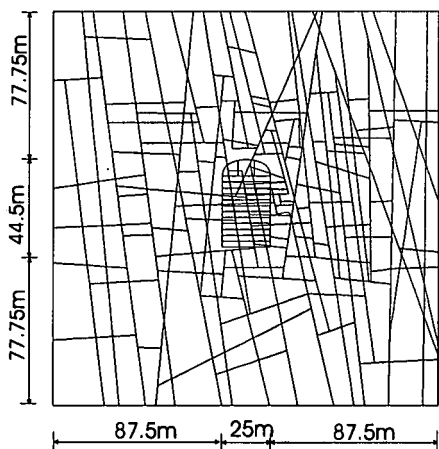
3. 岩石基質部の破壊後特性の相違による支保効果の比較

不連続性岩盤内に立地する地下発電所程度の大規模地下空洞を対象として新規亀裂の発生・進展を考慮した個別要素法を適用し掘削による周辺岩盤の破壊や変形挙動、さらには支保効果を評価する。ここでは比較のため、岩石基質部の力学モデルを弾塑性体とした場合の結果と比較する。

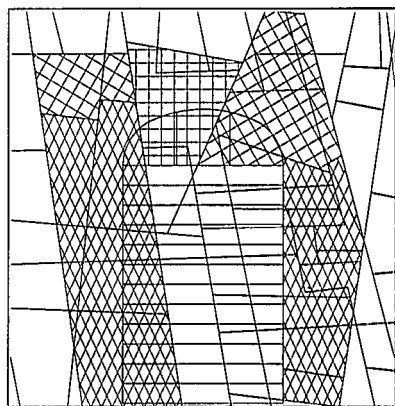
(1) 解析の概要

解析の対象は、天盤部が地下300mに位置し、高さ44.5m、幅25mを有する弾頭型の空洞である。個別要素法による解析モデルを図一2に示す。解析領域は、一般に圧縮領域場における岩盤空洞の掘削による変形領域が空洞近傍に集中することから、空洞縦寸法の4倍を対象と考慮して200m×200mとした。空洞周辺の岩盤は、C₄級砂岩を主体として新鮮かつ風化は少ない。既存不連続面の分布は、鉛直方向を中心とする比較的連続した不連続面群と、水平方向を中心とする比較的連続な不連続面群が卓越している。岩石基質部の力学特性を表一に示す。また、室内力学特性試験⁴⁾の結果より不連続面にはCoulombモデルの適用が可能であるとし、その物性値を表二に示す。解析領域の境界周囲には、岩盤と同一の物性値を有する弾性体無限地盤を導入した。解析の手順は、側圧係数K₀=1.0の初期地山応力分布を再現後、各掘削段階で平衡状態を達成させながら、アーチ部3ステップ、続いてベンチ部12ステップを順次掘削した。

岩石基質部での亀裂発生を考慮する場合は潜在面を定義しておく必要がある。まず、左右の側壁部では、一般的にせん断破壊による滑りの発生が潜在的であると考え、滑り破壊が再現できることを優先的に考慮して最大主応力面からの破断角(45°+ $\phi/2$)を亀裂の発生方向と考え、この方向に潜在面を定義した。ここで、破断角は、内部摩擦角 $\phi=40^\circ$ より65°と評価される。一方、天盤部では、引張破壊による落盤の発生が潜在的であると考え、崩落が再現できることを優先的に考慮して主軸の方向と同一方向に潜在面を定義した。以上に基づき、図一2に示した解析モデルに対して亀裂発生・進展を表現できる解析モデルを図一3に示す。なお、表一に示す岩石部基質部の粘着力、内部摩擦角、引張強度のそれぞれを亀裂発生を規定するパラメータ c 、 ϕ および σ_t として適用する²⁾。



図ー２ 個別要素法解析モデル(基質部+既存不連続面)



図ー３ 定義した潜在面

(2) 空洞周囲の破壊状況および変形挙動(無支保の場合)

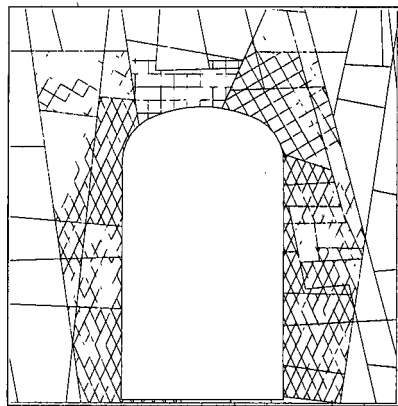
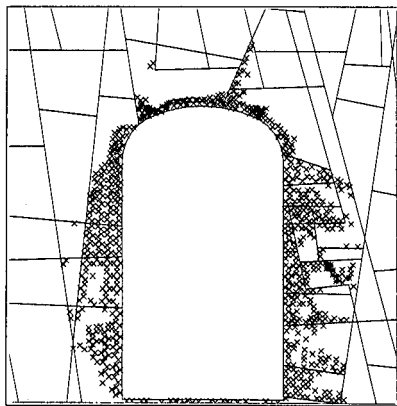
無支保で掘削した場合、図ー２の解析モデルにおいて岩石基質部を弾塑性体とした掘削完了時の空洞周囲の塑性降伏状況、および、図ー３の解析モデルにおける掘削完了時の亀裂発生・進展状況をそれぞれ図ー４に示す。前者では、天盤部で内空面に沿って幅6m程度の塑性降伏域が発生している。また、左側壁部では標高の低下に伴い塑性降伏域の幅が広がり呈している。右側壁部ではばらつきはあるものの標高に関らず塑性降伏域の幅に明確な変化は見られない。これらの分布の状況は、既存不連続面の分布特性に大きく影響されていると思われる。一方、後者では、天盤部、側壁部共に空洞周囲にほぼ一定幅で新規亀裂が発生している。また、亀裂の発生要因としてはせん断が卓越的である。以上より、岩石基質部の破壊後特性の取り扱いの相違により空洞周囲での破壊の拡大の程度が異なることが分かる。

次に、岩石基質部の破壊後特性の取り扱いの相違による空洞周囲の変位の大きさを比較する。まず、空洞上部2m位置における沈下量と空洞中心からの距離の関係を図ー５(a)に、また、空洞天盤より上方20mまでの鉛直距離と沈下量の関係を図ー５(b)に示す。さらに、空洞左側壁および右側壁での内空変位と空洞底面からの高さの関係をそれぞれ図ー６(a)、図ー６(b)に示す。ここでは比較のために岩石基質部の破壊を考慮しない(弾性体でモデル化)場合の結果も合わせて示す。これより、弾塑性体としてモデル化した場合は破壊を考慮しない場合に比較して若干大きな沈下が得られている。これは岩石基質部で発生した塑性ひずみによるものと思われる。これに対して、岩石基質部での亀裂発生を考慮した場合は他の2つの力学モデルの場合に比較して、天盤部では空洞位置を中心に大きな沈下が得られている。側壁部の内空変位においても天盤部で得られた沈下量の傾向と同様であるが、特に、亀裂発生を考慮した場合は発生亀裂が周方向に大きく拡大している側壁上部の箇所において比較的大きな変位が得られている。これは、特にこの箇所ので発生した亀裂が多く、不連続体としての挙動が卓越的であることによるものと思われる。

(3) 支保による空洞周囲の破壊および変位の抑制効果

ここでは支保をPSアンカーおよび吹付けコンクリートに限定し、補助的なロックボルトや2次覆工は考慮しない。PSアンカーは、天盤部では全長10m、側壁部では全長15mとし、それぞれ5mの定着長を有するものとした。吹付けコンクリートは、アーチ部で32cm、側壁部で24cmの厚さを有し、これをはり要素でモデル化した。岩石基質部を弾塑性体としてモデル化した場合および亀裂発生を考慮した場合のそれぞれに対して同一の支保を考慮し掘削した。図ー７に掘削完了時における空洞周囲の塑性状況および亀裂発生・進展状況をそれぞれ示す。前者では、発生した塑性箇所は無支保の場合に比較して特に側壁部でかなり減少していることが分かる。一方、後者では、発生した新規亀裂は無支保の場合に比較して天盤部と左側壁部において大幅な減少が見られる。しかし、既存不連続面の分布密度が比較的高い右側壁部では支保による破壊の抑制効果はあまり見られず、破壊の抑制の程度は既存不連続面の分布特性に影響を受けるものと思われる。

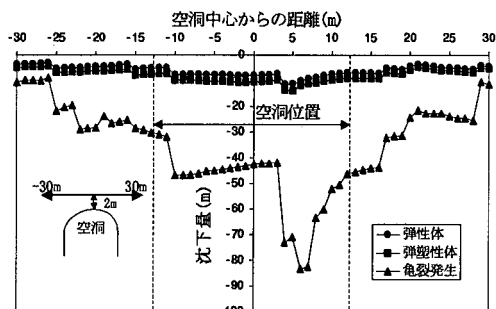
次に、支保を考慮したことによる変位抑制効果を考察するため、岩石基質部でのそれぞれ異なる破壊後特性に対して無支保の場合に得られた変位から支保を考慮した場合に得られた変位を差し引いた相対変位を図ー８に示す。同様に比較のために岩石基質部を弾性体としてモデル化した場合の結果も合わせて示す。これより、岩石基質部での亀裂発生を



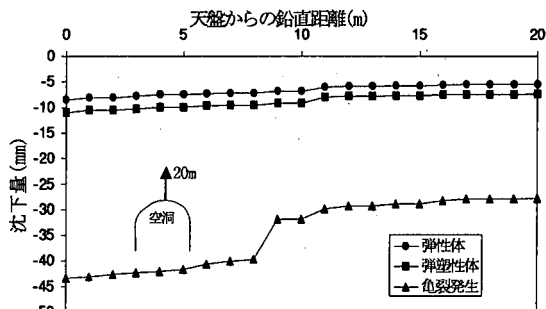
(a) 岩石基質部を弾塑性体とした場合の塑性降伏状況

(b) 岩石基質部での亀裂発生を考慮した場合の亀裂発生・進展状況 (赤線はせん断による / 青線は引張による)

図一四 空洞周囲の破壊状況の比較 (無支保の場合)

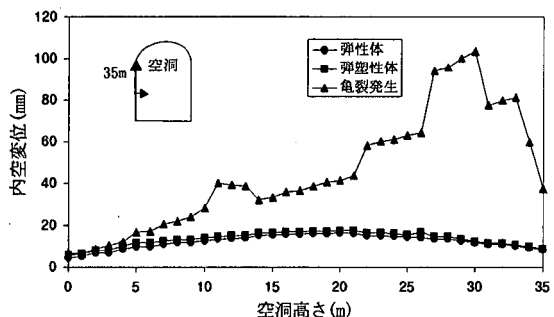


(a) 天盤上方 2 m 水平位置

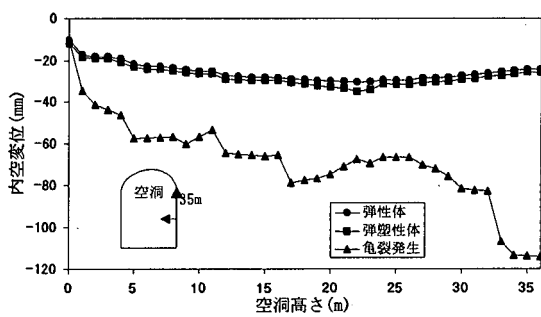


(b) 天盤より上方 20 m までの鉛直位置

図一五 空洞上部における沈下の比較 (無支保の場合)



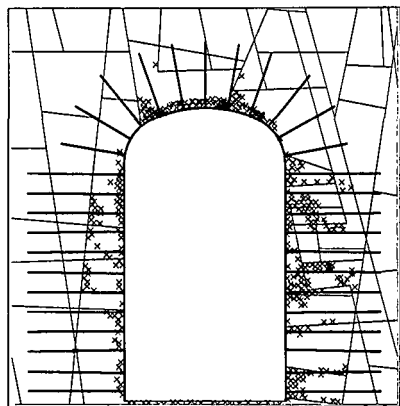
(a) 空洞左側壁部



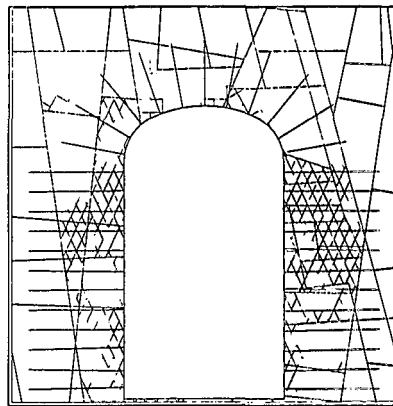
(b) 空洞右側壁部

図一六 空洞側壁部における内空変位の比較 (無支保の場合)

考慮した場合は、他の 2 つの場合に比べて大きな変位抑制効果が得られている。これは、無支保では岩盤の破壊後の挙動特性として亀裂の発生進展を考慮した場合は亀裂発生箇所は不連続体として挙動するため、破壊後も連続体を維持する弾塑性体を適用した場合に比較して大きな変形が発生し、これに対応した変位抑制効果が得られたためと考えられる。亀裂発生を考慮する場合の空洞周囲の変形の程度は、潜在面の定義方法に依存するが、これを合理的・客観的に定義する方法³⁾は現在著者らが検討を進めている。

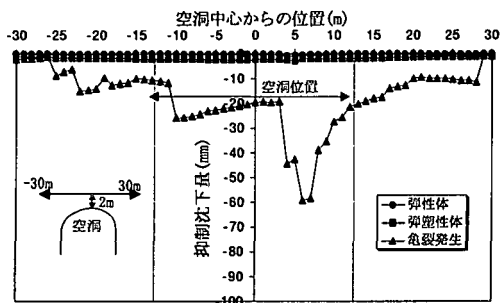


(a) 岩石基質部を弾塑性体とした場合の塑性降伏状況

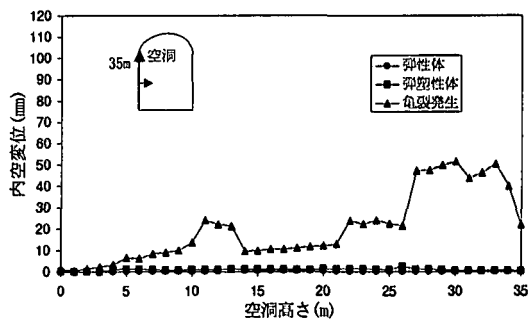


(b) 岩石基質部での亀裂発生を考慮した場合の亀裂発生・進展状況 (赤線はせん断による/背線は引張による)

図一七 空洞周囲の破壊状況の比較(支保の場合)



(a) 天盤上方 2 m 水平位置



(b) 空洞右側壁部

図一八 支保による変位の抑制

4. おわりに

本研究では、岩石基質部での破壊後特性の取り扱いが異なると破壊の分布状況や支保効果が異なる結果が得られた。これより、適切な支保効果を評価するには、降伏あるいは破壊後も含めた岩盤の挙動特性が十分に表現できる力学モデルや解析手法を適用することが重要であると思われる。今後は、PSアンカーや吹付けコンクリートの断面力に基づく考察、PSアンカーの打設パターンによる支保効果の相違、斜面、基礎などの他の岩盤構造物を対象とした場合の支保効果を検討し、支保設計において本解析手法を適用することの有効性を明らかにしていく予定である。

参考文献

- 1) 例えば、木梨秀雄，天野 悟，土原久哉，田中達也，吉岡直也，藤原紀夫：大規模地下空洞におけるケーブルボルトの支保効果に関する解析的検討，大林組技術研究所報 No. 53，pp. 53-58，1996。
- 2) 中川光雄，蔭 宇静，江崎哲郎：個別要素法を用いた不連続性岩盤における亀裂発生・進展のモデル化，土木学会論文集，No. 631/Ⅲ-48，pp. 397-410，1999。
- 3) 中川光雄，蔭 宇静：亀裂発生・進展を考慮した拡張個別要素法の岩盤挙動解析への適用性について，土木学会論文集（投稿中）
- 4) 蔭 宇静，中川光雄，江崎哲郎：岩盤不連続体解析に必要とする不連続面の挙動特性の評価法，土木学会論文集，No. 624/Ⅲ-47，pp. 231-243，1999。