

## 岩盤挙動解析のための亀裂発生・進展のモデル化

### MODELING OF GENERATION AND PROGRESS OF NEW CRACKS IN DISCONTINUOUS ROCK MASSES

中川光雄\*・蔣 宇静\*\*・江崎哲郎\*\*\*

Mitsuo NAKAGAWA, Yujing JIANG and Tetsuro ESAKI

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 in slopes, foundation ground and caverns. It is thought that stability of those rock structures extremely depend on both existent discontinuities and new cracks which are generated and progress due to loading or excavation. In this paper, a rational method to define the potential cracks for analysis of generation and progress of cracks in rock masses is studied. The new mechanical model of discontinuities proposed by authors is applied for the existent discontinuities. Those two studies are clarified through a simulation of underground opening excavation.

#### 1. はじめに

不連続性岩盤を対象とした解析手法では、岩盤中の不連続面の一つ一つの挙動を具体的に表現する不連続体としてモデル化するアプローチがある。このアプローチでは、不連続面の幾何学的分布特性を把握することと同時に、その力学的特性を解明することが妥当性や信頼性において重要な課題である。著者らは先に、自然状態にある単一不連続面を対象として、室内せん断試験の結果を忠実に再現することを意図して、実際の応力状態やせん断履歴などを再現した室内せん断試験結果に基づいて定式化した不連続面の力学モデルを提案している<sup>1)</sup>。ここでは、この定式化を個別要素法における不連続面の構成モデルとして組み込み、不連続面の室内せん断試験の結果と個別要素法解析の結果を比較することにより、その妥当性を検証している。一方で、不連続性岩盤に立地する岩盤構造物の安定機構は、既存の(自然状態での)不連続面の挙動のみならず、載荷や掘削により新たに発生する亀裂によっても大きな影響を受けると考えられる。これに対しても、著者らは先に、既存不連続面の挙動プロセスと共に、せん断や引張による岩石基質部での新たな亀裂の発生および進展を表現する個別要素法による解析的アプローチを提案している<sup>2)</sup>。ここでは、岩石基質部に発生する亀裂は個別要素法におけるブロック境界面として予め設定する方法を取り、これの客観的、合理的な定義方法が課題として残されている。

本論文では、後者の提案において課題である発生する亀裂の客観的、合理的な定義方法について検討した。また、より信頼性の高い不連続体解析を実現するため、亀裂の発生・進展を適切に考慮することと同時に、既存の不連続面に対してもより精度の高い力学モデルを適用することが重要であると考えられる。そこで、既存の不連続面には前者の提案を適用した上で、岩石基質部に対しては後者の提案を導入した複合的な解析を試みた。以上の検討は、不連続性岩盤内に立地する地下発電所の掘削問題において実施し、その妥当性を考察した。

#### 2. 個別要素法による亀裂発生・進展のモデル化

個別要素法では、岩盤不連続面は岩塊ブロックの境界面として取り扱われ、因って、岩塊ブロックは岩盤不連続面に囲まれた岩石基質部となる。発生する単一亀裂の方向に関しては、何らかの定式化により逐次的に決定する研究も見受けられるが、提案では、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面として予め定義しておく方法を用いる。そして、載荷初期にはこの境界面を挟む岩石基質部が一体となり連続体として挙動するよう周囲の岩石基質部と等価な剛性と強度を与える。また、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され、以降は岩盤不連続面として挙動する。ここでは、このブロック境界面を「潜在面」と称する。

\* 正会員 博(工) (株)CRC総合研究所 課長役 科学システム事業部西日本科学システム部

\*\* 正会員 博(工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科

\*\*\* 正会員 工博 九州大学教授 大学院工学研究科環境システム科学研究センター

## 2.1 亀裂発生条件式

潜在面が亀裂と判定される条件として、ここでは、Coulomb基準のような面応力に基づいて不連続面に与えられる降伏・破壊条件ではなく、岩石基質部（個体）に与えられる降伏・破壊条件を適用し、且つ、それをせん断、引張のそれぞれに対して定義すべきであると考える。そこで、Mohr-Coulomb基準に基づいて、せん断による亀裂の発生条件として式（1）を、また、引張による亀裂の発生条件として式（2）を適用する。

$$f_s = (1 - \sin \phi) \sigma_1 - (1 + \sin \phi) \sigma_3 - 2c \cos \phi \quad (1)$$

$$f_t = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

ここで、 $c$ 、 $\phi$ および $\sigma_1$ は亀裂の発生開始を規定するパラメータである。

## 2.2 亀裂発生条件式に要する主応力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ の評価

式（1）、式（2）の主応力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ は、潜在面の位置において評価されるべきと考える。潜在面は、亀裂発生以前における仮想的な不連続面であり、この位置では応力と変位の連続性が実現されている。提案では、これに基づき、Airyの応力関数 $\Phi(x, y)$ を補間関数として用いて潜在面の近傍の岩石基質部の応力テンソルから潜在面位置の応力テンソルを求める。図-1に示すように離散化された各々の潜在面の中心位置 $(x, y)$ をその潜在面の代表点と考えると、これを応力関数 $\Phi$ に与えると、潜在面の位置での応力テンソル $(\sigma_x, \tau_{xy}, \sigma_y)$ 、さらには主応力 $(\sigma_1, \sigma_3)$ が評価される。

## 2.3 個別要素法における亀裂発生アルゴリズム

上述した亀裂発生の判定を含む個別要素法の計算サイクルを図-2に示す。これより、亀裂の発生条件は、計算サイクル開始位置にて1サイクルにつき1回実行されることが分かる。さらに、亀裂の発生の判定に係るアルゴリズムは、図-3に示される。この処理は、個別要素モデルにおける全てのブロック境界面のうち、潜在面として定義されたもののみが対象となる。

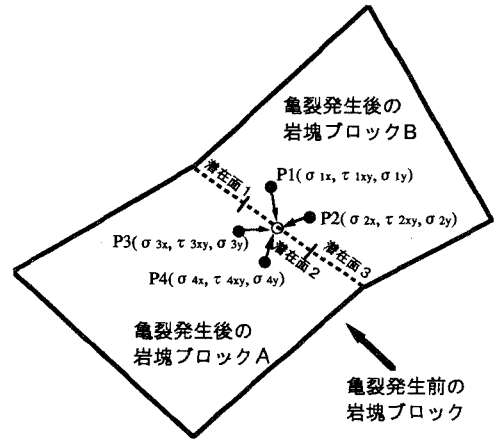
## 2.4 亀裂の進展の表現

発生した亀裂は、個別要素法の計算における岩盤不連続面として挙動し、これがその周囲に逐次的な応力再配分を誘起する。この応力再配分の過程において既に亀裂となった不連続面の隣接もしくは近傍にある別の潜在面において亀裂の発生条件が満足されるなら、これが新たな亀裂の発生となる。因って、この順次発生する潜在面の亀裂化を亀裂の進展の表現と考える。

## 3. 亀裂発生・進展解析

### 3.1 解析例の概要

解析の対象は、天盤部が地下450mに位置し、高さ50m、幅25m、弾頭型の地下発電所空洞である。解析モデルを図-4に示す。解析領域は、一般に圧縮応力場



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つの潜在面が順次亀裂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-1 潜在面の定義と亀裂発生条件式に要する主応力の評価<sup>2)</sup>

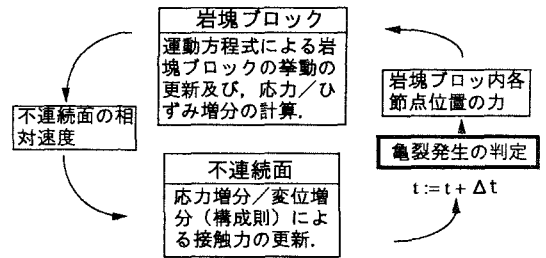


図-2 個別要素法の1計算サイクル $\Delta t$ のプロセス<sup>2)</sup>  
( $\Delta t$ は1計算サイクルに要する微小時間増分)

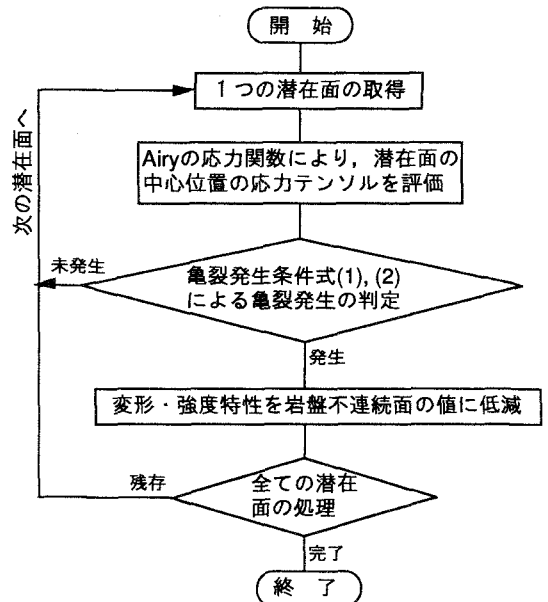


図-3 亀裂発生の処理の流れ<sup>2)</sup>

における岩盤の大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倍を対象と考えて200m×200mとした。空洞周辺の岩盤は、砂岩を中心として新鮮、堅硬かつ風化の少ない $C_M \sim C_L$ 級である。また、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不連続な不連続面群が卓越的である。岩石基質部の力学的特性を表-1に示す。また、不連続面には、室内力学特性試験<sup>3)</sup>の結果よりCoulombモデルを適用するものとし、特性値を表-2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。側圧係数 $K_0=0.6$ の初期地山応力分布を再現後、無支保の状態でご掘削段階で平衡状態を達成させながら、順次、アーチ部掘削、盤下げ掘削を実施した。

図-5に、盤下げ5段ベンチ完了時点において、不連続面のうち剥離する直前である箇所を示す。これより、空洞周辺にはキーブロックが形成されていないことが分かり、空洞は安定していると考えられる。

### 3.2 潜在面の客観的、合理的な定義の方法

2章で示した亀裂発生・進展解析の信頼性は、潜在的に発生する亀裂の領域、寸法、方向を如何に適切に予測するか大きく依存する。因って、潜在面の定義は客観的、合理的であることが要求される。そこで、本論文では、予備的な解析の結果とこれに比較的客観性のある判断を加えて上述の要因を予測し、潜在面を定義する方法を提案する。まず、発生する亀裂の領域は、図-6(a)に示す弾塑性解析から得られた塑性発生領域に類似すると考える。次に、その方向は、図-6(b)に示した主応力ベクトルの分布に基づいて、空洞周囲において主軸の方向を一様と見なせる区域を図-6(c)のように考えた。これより、左右の側壁では最大主応力面からの破壊角( $45^\circ + \phi/2$ )を亀裂の発生方向と考える。ここでは、内部摩擦角 $\phi=40^\circ$ より得られる破壊角は $65^\circ$ である。側壁は、一般にせん断破壊による岩盤滑りの発生が潜在的であり、破壊角の適用は妥当であると考えられる。一方、天盤部での亀裂の発生原因を予測するならば、引張である可能性を考えることが妥当であると思われる。もっとも引張応力の発生状況は、一般に側圧係数に依存する傾向がある。ここでは、側圧係数の大きさによらず引張の発生に対応するため、亀裂の発生方向は主軸の方向に一致すると考える。天盤部は、一般に落盤の発生が潜在的であり、この考えは妥当であると思われる。

以上に基づき、図-4で示した解析モデルに対して潜在面を定義して図-6(d)に示すような亀裂発生・進展解析に対応した解析モデルを構築した。ここで、図-6(c)に示した各区域では、潜在面の最外郭は既存の不連続面に一致するように定義した。

### 3.3 亀裂発生・進展解析の結果と考察

図-6(d)に示した解析モデルに対して、アーチ部掘削、盤下げ掘削を実施した。亀裂の発生開始を規定する

表-1 空洞周辺岩盤の物性値 (岩石基質部)

ヤング係数	3.03(GPa)
ポアソン比	0.17
密度	2.50(g/cm <sup>3</sup> )
粘着力	1.00(MPa)
内部摩擦角	40.0(°)
引張強度	3.50(MPa)

表-2 空洞周辺岩盤の物性値 (既存の不連続面)

垂直剛性率	20.0(GPa/m)
せん断剛性率	0.8(GPa/m)
粘着力	0.0(MPa)
摩擦角	25.0(°)

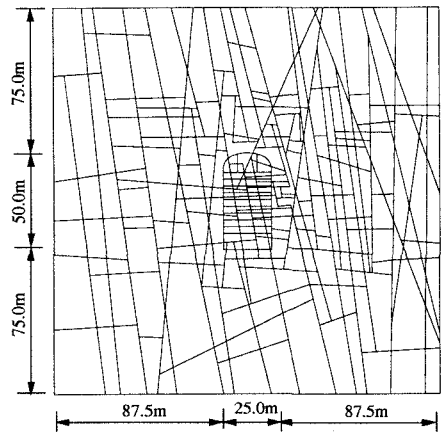


図-4 地下発電所空洞の個別要素モデル

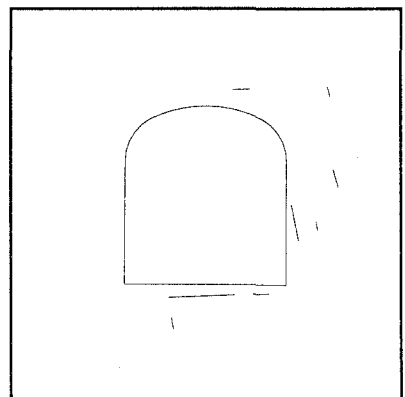
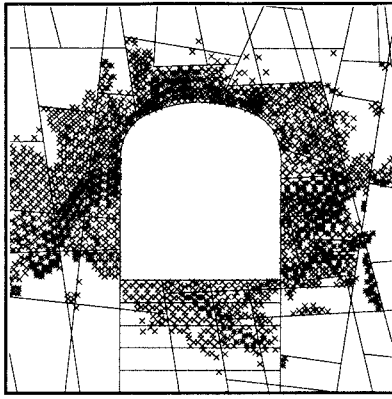
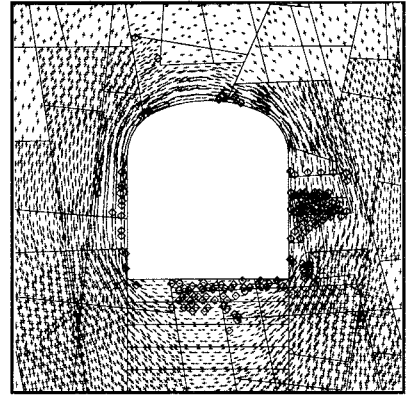


図-5 既存不連続面のうち剥離直前である箇所

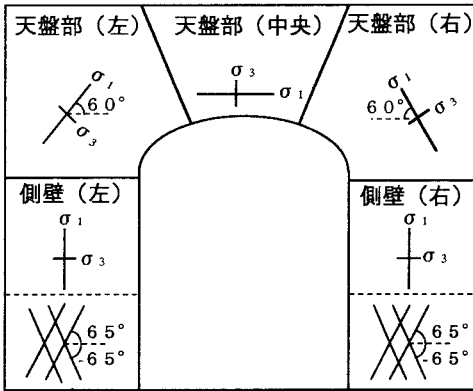
パラメータ $c$ 、 $\phi$ および $\sigma_c$ には、表-1に示す粘着力、内部摩擦角、引張強度をそれぞれ適用した。図-7(a)



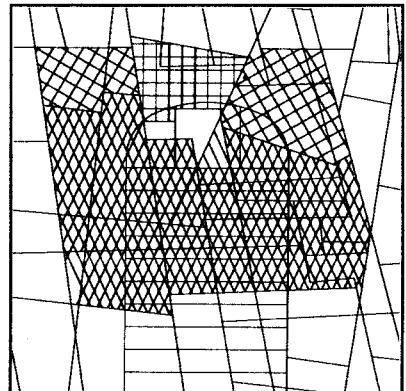
(a) 塑性領域



(b) 主応力ベクトルの分布 (◇は引張応力発生箇所)



(c) 区域化された主応力ベクトルと潜在面の方向



(d) 既存不連続面, および, 定義した潜在面 (緑色線)

図-6 潜在面の定義のプロセス

に、アーチ部掘削完了時点での周辺岩盤の亀裂発生・進展状況を示す。また、図-7(b)に既存の不連続面および亀裂となった潜在面のうち、剥離する直前である箇所を複合的に示す。これより、キーブロックがアーチ右上部と左上部にそれぞれ形成されており、天盤部での危険箇所が予測できたとと言える。図-8に、盤下げ5段ベンチ完了時点で岩盤の破壊および亀裂発生・進展状況を示す。これより、アーチ部掘削完了時点でキーブロックを形成していた岩塊が崩落していることが分かる。また、側壁部にも亀裂の発生が拡大しており、以降の盤下げに伴い空洞内空へのすべり破壊の可能性も考えられる。

### 3.4 既存不連続面の力学モデル

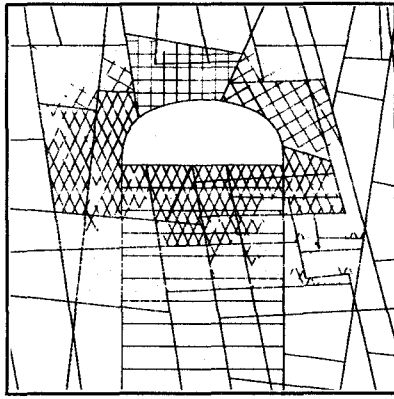
前節3.3に示した解析では、既存の不連続面に対してCoulombモデルを適用したが、ここでは、図-9(a)に示す室内試験結果を忠実に再現する著者らの提案した力学モデル<sup>1)</sup>を適用し、亀裂の発生・進展を考慮した同様の掘削解析を実施した。

図-9(b)に、亀裂の発生・進展状況を示す。図-7(a)で示した結果を比較すれば、図-9(b)に示した亀裂発生領域は若干小さいことが分かる。さらに、図-9(c)

より、空洞周囲にはキーブロックが全く形成されないことが分かる。これは、表-2に示したせん断剛性率やせん断強度よりも図-9(a)に示すせん断剛性率やせん断強度(ピーク、残留)の方が大きいことによると考えられる。これより、既存不連続面の变形・強度特性の相違が亀裂の発生・進展に影響を及ぼすことが分かる。

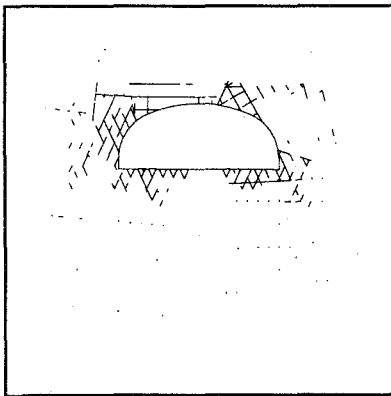
## 4. おわりに

本論文では、潜在面の定義方法について検討し、客観的、合理的な1つの方法を提案できたと考える。しかし、さらに深く議論し検討を進める必要があると考える。また、個別要素法による亀裂の発生・進展解析の信頼性は、現場計測の結果などと比較して検証することが理想的であるが、まずは室内模型実験の結果と比較し検証する予定である。最後に、既存の不連続面に著者らの提案した力学モデルを適用し、岩石基質部には亀裂の発生・進展の表現を導入した複合的な解析を試みたが、現時点では検討が不十分であり、さらに深く検討を進めて行く予定である。



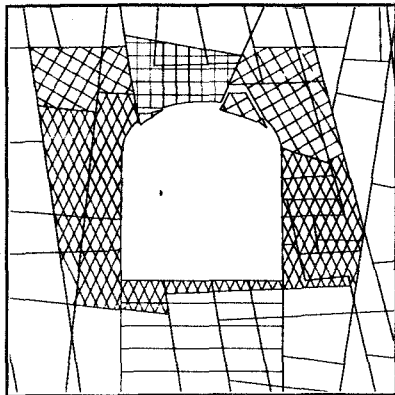
赤色線 せん断 (式(1)) により発生した亀裂  
 青色線 引張 (式(2)) により発生した亀裂

(a) 亀裂発生・進展状況



(b) 岩盤不連続面のうち剥離直前である箇所

図一七 アーチ部周辺の岩盤の破壊状況

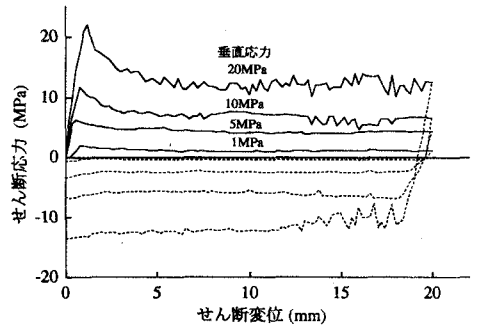


赤色線 せん断 (式(1)) により発生した亀裂  
 青色線 引張 (式(2)) により発生した亀裂

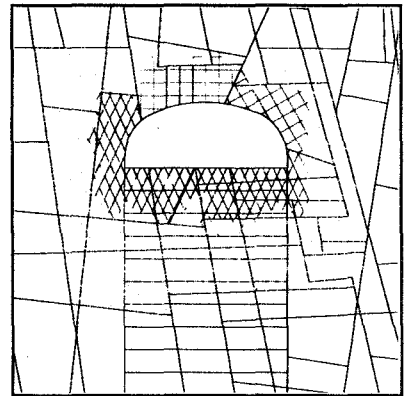
図一八 5段ベンチ掘削完了時の亀裂発生・進展状況

参考文献

1) 中川光雄, 蔣 宇静, 江崎哲郎: 地下空洞安定解における岩盤不連続面の力学的挙動モデルの提案と適用, 土木学会論文集, No.603/Ⅲ-44, pp.53-66, 1998.

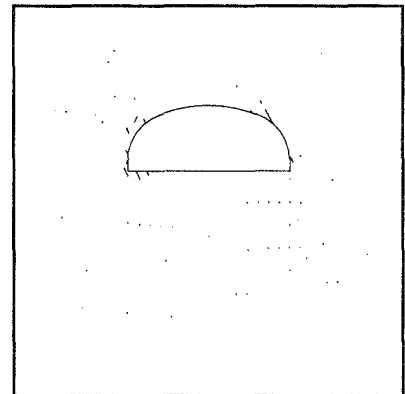


(a) 室内試験の結果  
 (不連続面のせん断応力-せん断変位曲線)



赤色線 せん断 (式(1)) により発生した亀裂  
 青色線 引張 (式(2)) により発生した亀裂

(b) 亀裂発生・進展状況



(c) 岩盤不連続面のうち剥離直前である箇所

図一九 著者らの不連続面力学モデルを適用した亀裂発生・進展

2) 中川光雄, 蔣 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) 蔣 宇静, 中川光雄, 江崎哲郎: 岩盤不連続体解析に必要な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.