

# 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

中川 光雄<sup>1</sup>・蔣 宇静<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) (株)CRC総合研究所 関西支社 課長役 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 長崎大学助教授 工学部 社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

著者らは先に、不連続性岩盤における既存不連続面のせん断プロセスと共に、せん断や引張による岩石基質部での新たな亀裂の発生・進展を個別要素法において表現できる解析手法を提案した。本論文では、新規亀裂の発生・進展を追跡するために予め定義する必要のある潜在的な亀裂(潜在面)を客観的に定義する方法を示す。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考察する。そして、これを地下空洞掘削解析に適用して、亀裂発生に起因する変形挙動や破壊などの実際現象をより直接的に表現することを意図した本解析手法の岩盤挙動解析としての有効性を考察する。

*Key Words: discontinuous rock mass, cracking, base friction model, enhanced distinct element method (EDEM)*

## 1. はじめに

不連続性岩盤に立地する大型建造物の建設や掘削などによる周辺岩盤の変形・破壊の大部分は、岩盤不連続面に沿うせん断やダイレーションに起因することが多いと考えられる。そして、これら岩盤の安定機構は、施工前から存在する自然の不連続面の挙動のみならず、載荷や掘削などの施工に起因して新たに発生し進展する亀裂の挙動に大きく依存すると考えられる。著者らは先に、既存(自然の)不連続面の挙動プロセスのみならず、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個別要素法で表現する解析手法を提案した<sup>1)</sup>。その定式化の妥当性は、掘削問題と斜面問題を対象として理論的に示されている解析結果と比較することで示した。また、地下発電所空洞掘削問題や岩盤斜面上の橋梁基礎の安定問題への適用を行った。ところで、解析結果は、予め定義する必要のある潜在面に大きく支配されるため、これの適切な定義方法を明確にすることが必要である。

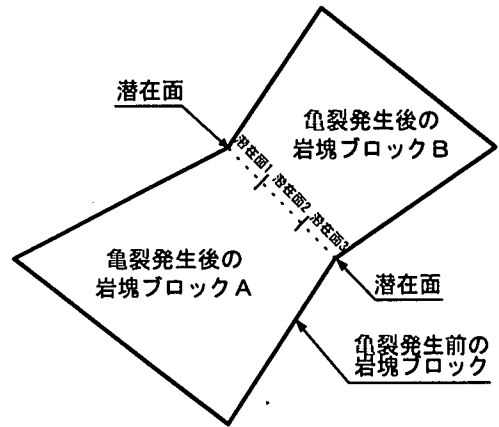
本論文では、まず、潜在面を定義する際の指標となる亀裂発生方向、亀裂発生間隔、さらには、亀裂発生領域を、より客観的、合理的に決定する方法を提案する。次に、解析手法の実用性を検証するために実際の現場との相似則を満足する定量的な室内模

型実験である底面摩擦模型実験を実施して、実験結果と解析結果を比較し考察する。以上に基づいて、亀裂発生に起因する変形挙動や破壊メカニズムを地下空洞掘削解析において表現し、本解析手法の岩盤挙動解析としての有効性を考察する。

## 2. 個別要素法による亀裂発生・進展のモデル化の概要<sup>1)</sup>

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。ところで、亀裂が発生し進展する現象を数値解析により表現する研究には、定式化により逐次的に決定した亀裂発生・進展方向に対して新たな不連続要素を生成させる方法<sup>2)・3)・4)</sup>も見受けられるが、中川ら<sup>1)</sup>は、実用的に現状の個別要素法をそのまま利用すべく、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面(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。ここで、図-1において破線で示した位置は、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相互の境界であり、これを潜在面として定義する。

亀裂が発生するまでこの潜在面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つの潜在面が直列に定義されており、例えば、潜在面1が亀裂発生条件により亀裂発生と判定されても他の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、岩塊ブロックAとBは完全には分離しない。亀裂として一旦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。ここで表現される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。以上のような潜在面の顕在化の進行を本論文では亀裂の進展の表現と考える。



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 潜在面の定義<sup>1)</sup>

### 3. 潜在面の客観的な定義方法

前章で示した解析手法に対して適用する潜在面が主観的な考え方や方法で定義されたなら、結果として得られる亀裂の発生や進展に対する信頼性は低いと考えられる。因って、潜在面を適切に定義することが解析手法の実用性において重要となる。このため、潜在的に発生し得る亀裂を客観的、合理的な方法で予測してこれに基づいて潜在面を定義することが必要であると考え。以下に、シミュレーションを実用性のある演算負荷に軽減するための「亀裂発生領域」、また、潜在面を定義する指標となる「亀裂発生方向」と「亀裂発生間隔」のそれぞれに対する客観的、合理的な定義方法を提案する。

#### (1) 亀裂発生領域

解析領域の全てに渡って潜在面を定義すれば、亀裂発生時の位置的な自由度が損なわれる可能性は少なくなる。しかし、個別要素法は一般に比較的多くの計算時間を要する解析手法であるため、潜在面をそのように定義すれば計算効率が著しく低下し、場合によっては非現実的な計算時間を要することも考えられる。そこで、実際問題を取り扱う場合は、亀裂が発生し進展すると予測される領域に対してのみ潜在面を定義すればよいと考える。この領域を解析的に予測するには、既存の不連続面からなる（潜在面

を含まない）解析モデルに対して亀裂発生条件式と同一の降伏条件式を適用して岩石基質部を弾塑性体とした解析を予備的に行い塑性領域を得る。この塑性領域が亀裂の発生領域に類似すると考えて、これを完全に包括する範囲に潜在面を定義すれば、亀裂が発生すると予測される領域に対して過不足なく新規亀裂の発生が表現されると考える。

#### (2) 亀裂発生方向

発生する亀裂の方向は、基本的には原位置データに基づいて予測すべきである。しかし、原位置データが不明確な場合や収集が不可能な場合は、解析的な予測方法を適用すればよいと考える。さらに、これを適用する上で、比較的客観性のある判断を補助的に用ると有効な場合がある。

##### a) 原位置データを利用する方法

個別要素法などの不連続体解析では、既存の不連続面として採用しないような小規模な節理などは潜在的に亀裂として発生する可能性があると考えられる。因って、これらの卓越方向がシュミットネットなどにおいてある程度明確に得られている場合は、これに基づいて潜在面の方向を決定することが妥当であると考え。

##### b) 解析的に求める方法

前節(1)で述べた予備的な解析の結果から得られる主応力の分布に基づいて、主軸の方向を一様と見なせる幾つかの区域を岩盤構造物の周辺に設定す

る。そして、それぞれの区域に対して亀裂発生要因をせん断あるいは引張と判断して発生方向を予測する。まず、亀裂発生要因をせん断と考える場合は、亀裂の発生方向を最大主応力面からの破断角 ( $45^\circ + \phi/2$ ) と考える。一方、それを引張と考える場合は、亀裂の発生方向は主軸の方向に一致すると考える。ここで、亀裂が進展し発生領域が拡大するに伴い応力再配分が生じて岩石基質部の主軸の方向は回転すると考えられる。本研究では今のところ、亀裂進展の初期における破断角を亀裂発生方向として採用しているが、実用的にはこの方法でも十分であると考えられる。

ところで、上述したある区域の亀裂発生要因としてせん断を優先的に考えるか引張を優先的に考えるかは、荷重の荷重方向や岩盤構造物の形状、規模などの状況に応じて判断すれば有効であると考えられる場合がある。例えば、地下空洞の側壁は、一般に滑りの発生が潜在的であり、亀裂発生要因としてせん断を優先的に考えることには妥当性があると思われる。一方で、天盤部は一般に落盤の発生が潜在的であり、亀裂発生要因として引張を優先的に考えることには妥当性があると思われる。この場合、引張応力の発生の程度は、一般に側圧係数に依存する傾向<sup>5)</sup>があることに留意する必要がある。

### (3) 亀裂発生間隔

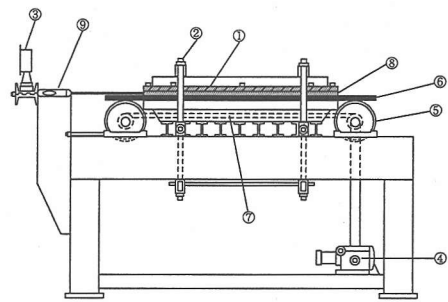
岩石基質部に発生する亀裂の間隔は、対象とする岩盤構造物の寸法との相対性を考慮して、(例えば、1/10程度) 亀裂発生に起因する岩塊の滑りや崩落が十分に表現できるように決定すればよいと考える。

### (4) その他の方法

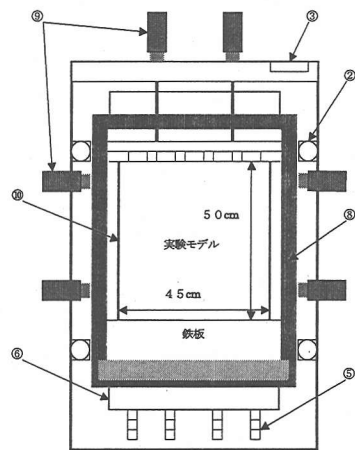
亀裂の発生状況を予測するのに十分な情報が得られない場合で、かつ、亀裂の発生を伴う岩盤の破壊様式が過去の事例や試験結果などから十分に認知されているような場合は、その分布形状を潜在面として直接用いる方法が考えられる。例えば、亀裂発生の分布形状にポロノイ多角形を適用した研究(参考文献6, 7)がある。

## 4. 模型実験による検証

解析手法の実用性を検証するための最も妥当な方法は、亀裂の発生・進展状況を観察できる原位置試験を実施するか、あるいは、施工時の観察結果と比較することである。しかし、これらの実施には設備的な制約が伴うため、本研究では、底面摩擦模型実験装置<sup>8)</sup>を用いて、想定した岩盤の亀裂発生・進展を



(a) 側面図



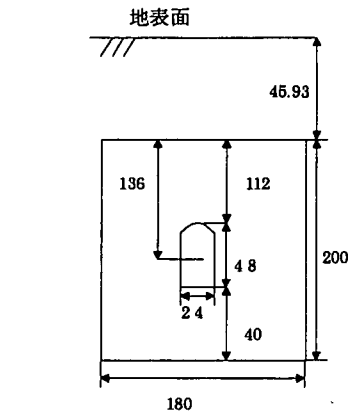
(b) 上面図

- ①上蓋, ②固定用支柱, ③圧力計, ④動力装置, ⑤ギア,  
⑥プレート, ⑦テーブル, ⑧フレーム, ⑨力計, ⑩ゴム版

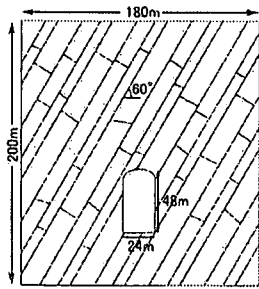
図一 2 底面摩擦模型実験装置

伴う変形挙動を実験的に表現し、これと解析結果を比較することにより検証する。この実験は、岩盤の挙動を表現する上で優れた重力効果模型実験の一つであり、モデル化した岩盤の変形・破壊挙動を連続的に観察できる。また、原地盤との相似則が満足される特徴がある。実際には、図一2に示すように一定速度で移動する摩擦面上に二次元の縮小地盤模型を水平に設置し、重力場の効果としてその底面に摩擦を与えて岩盤の挙動を表現する。

実験および解析の対象は、図一3に示す不連続性岩盤内に立地する大規模地下空洞とした。ここで、図一3(a)は空洞の相対的位置を、また、図一3(b)は、岩盤モデルを示す。不連続面の分布は、 $60^\circ$ の傾斜角を有し、間隔が16m, 12m, 8mである連続性のある不連続面群と、これに幾分ランダムな方向に交差する連続性の乏しい不連続面群とした。



(a) 空洞の位置・形状・寸法 (単位 m)



(b) 岩盤モデル (基質部+既存不連続面)

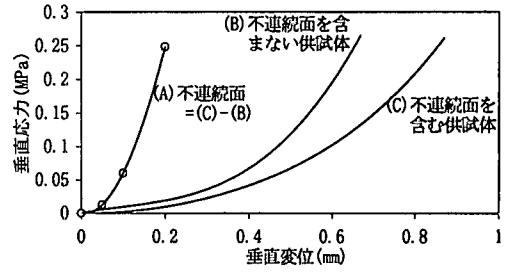
図一三 実験および解析の対象とした岩盤構造物

表一 模型材料の物性値

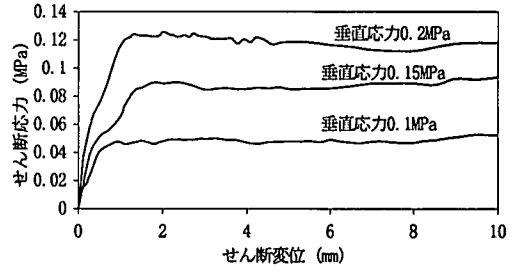
ヤング係数	415.52 (MPa)
ポアソン比	0.136
密度	1.505 (g/cm <sup>3</sup> )
粘着力	0.143 (MPa)
内部摩擦角	34.0 (°)
引張強度	0.055 (MPa)

### (1) 模型材料の力学特性

模型材料は、石膏・石灰・標準砂・水を重量比 1 : 3 : 12 : 3.61, さらに遅延剤としてリグニンスルホン酸ナトリウムを石膏の重さの 0.05% で混ぜ合わせ、乾燥させて作成した。模型材料の変形・強度特性は、三軸圧縮試験・一軸圧縮試験・圧裂試験により求めた。これを表一に示す<sup>8)</sup>。また、模型材料の積み重ねによって形成される接触表面 (不連続面) の力学

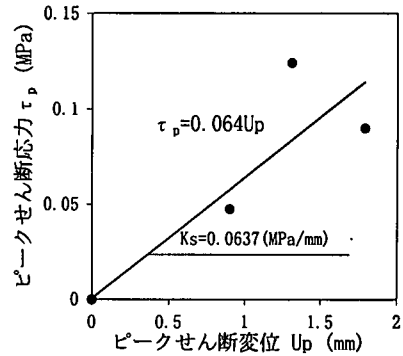


(a) 垂直応力-垂直変位の関係

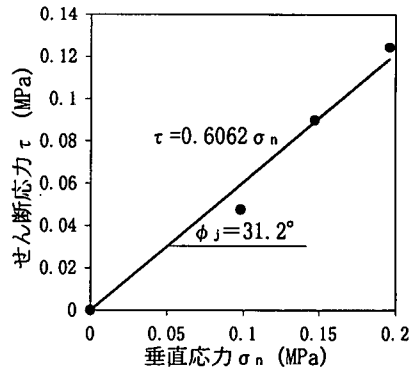


(b) せん断応力-せん断変位の関係

図一四 模型材料の不連続面の力学特性試験の結果



(a) 回帰分析によるせん断剛性  $K_s$  の評価



(b) 回帰分析による摩擦角  $\phi_j$  の評価

図一五 Coulomb モデルの特性値の評価

表一 2 模型材料の不連続面の物性値

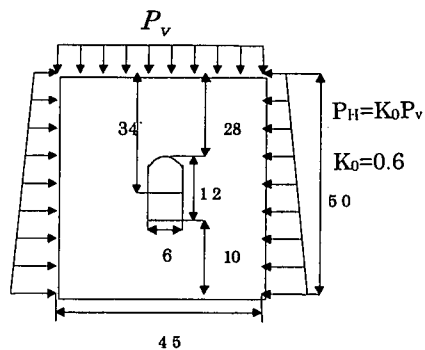
垂直剛性(Kn)	図一4(a)の曲線(A)
せん断剛性(Ks)	63.7(MPa/m)
粘着力( $c_j$ )	0.0(MPa)
摩擦角( $\phi_j$ )	31.2(°)
引張強度( $\sigma_{tj}$ )	0.0(MPa)

特性は、先に著者らが提案した岩盤不連続面の室内試験に基づく特性値評価方法<sup>9)</sup>により求めた。まず、垂直載荷における不連続面の变形特性は、垂直剛性試験により求めた。図一4(a)は、不連続面を含む供試体の垂直変位から不連続面を含まない供試体の垂直変位を差し引いて得られた不連続面自体の垂直応力—垂直変位の関係を示す。これより、不連続面の垂直挙動が非線形性を示すことが分かる。一方、不連続面のせん断挙動特性は、一面せん断試験により求めた。図一4(b)に、垂直応力 $\sigma_n$ としてそれぞれ0.1MPa、0.15MPa、0.2MPaを与えて10mmまでせん断した時のせん断応力—せん断変位の関係を示す。これより、ピーク時まではほぼ線形的な挙動を示し、ピーク後もピーク強度と残留強度にあまり差が見られないことが分かる。

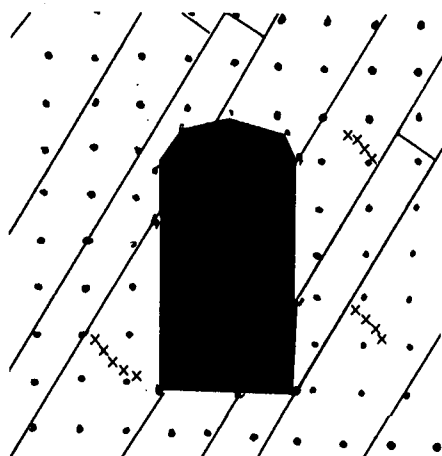
以上より、ここで適用する不連続面の力学モデルを考えると、垂直挙動に対しては図一4(a)に示す垂直応力—垂直変位の関係(曲線(A))を用いる。また、せん断挙動に対しては試験結果よりCoulombモデルを適用しても実用上は十分な精度が得られると判断する。Coulombモデルの物性値の1つであるせん断剛性Ksは、図一5(a)に示すように一面せん断試験で用いた各垂直応力 $\sigma_n$ におけるピーク時のせん断応力 $\tau_p$ とそれに対するせん断変位 $u_p$ の関係を、また、摩擦角 $\phi_j$ は、図一5(b)に示すように各垂直応力 $\sigma_n$ とピーク時のせん断応力 $\tau_p$ の関係を、それぞれ回帰分析することにより評価した。以上により決定された模型材料の不連続面の物性値を表一2に示す。

(2) 実験モデルおよび実験結果

図一6に示す実験モデルは、混合した材料を供試体作製箱に入れて常温で1日、100°で2日間乾燥させ、それを削り45cm×50cmの枠の中に60°の傾斜角で幅や長さの異なる供試体を並べて不連続面を形成して作成した。ここで、幾何スケールは $\Lambda = 400$ となる。また、本実験では大深度を想定しているため、実験モデルの境界に鉛直応力および水平応力を載荷した。実験中にモデル表面にかけた空気圧に基づき応力スケールは $\Sigma = 17.86$ と求められた。実験の手



図一6 実験モデル(単位cm)



図一7 模型実験の結果(×印は発生した亀裂)

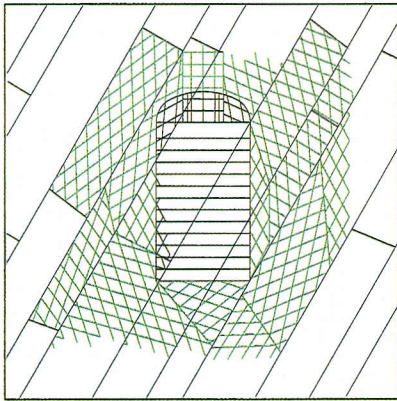
表一3 実地盤の岩石基質部の物性値

ヤング係数	7421(MPa)
ポアソン比	0.136
密度	2.5(g/m³)
粘着力	2.555(MPa)
内部摩擦角	34.0(°)
引張強度	0.9823(MPa)

表一4 実地盤の不連続面の物性値

垂直剛性(Kn)	図一4(a)の曲線(A)
せん断剛性(Ks)	1137.7(MPa/m)
粘着力( $c_j$ )	0.0(MPa)
摩擦角( $\phi_j$ )	31.2(°)
引張強度( $\sigma_{tj}$ )	0.0(MPa)

(応力スケール $\Sigma = 17.86$ )



(潜在面は綠色線で表示)

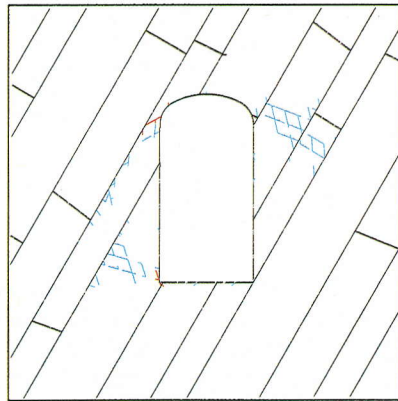
図一八 亀裂発生・進展解析のモデル

順は、実験モデルに上述の荷重をそのまま載荷して初期応力状態を再現した後、空洞掘削部分の材料を除去して載荷を続けた。実験の結果を図一七に示す。これより、空洞の左下部、右上部、右下部の3箇所において新規亀裂の発生が視覚によって明確に確認できる。

### (3) 亀裂発生・進展解析

亀裂発生・進展の解析を行うにあたり、先に示した幾何スケール $\Lambda$ と応力スケール $\Sigma$ により換算される実地盤スケールの力学特性を表一三および表一四に示す。定義した潜在面を含む解析モデルを図一八に示す。ここで、潜在面の定義領域は、3章で述べた予備的な弾塑性解析の結果から得られた塑性領域を十分に包括する範囲とした。また、方向は、その主応力の分布に基づき、空洞側壁の周囲ではせん断による滑り破壊が再現できることを優先的に考慮して破断角を適用し、一方、空洞天盤部では引張による崩落が再現できることを優先的に考慮して主軸の方向を適用した。ここで、亀裂発生は潜在面位置における応力が亀裂発生条件式を満足した時に表現されるので、解析結果として得られる亀裂発生要因と優先的に考慮した亀裂発生要因が必ずしも一致する必要は無く、新規亀裂の発生・進展に起因する破壊現象の再現には何ら支障は無いと考える。

解析結果を図一九に示す。これより、亀裂の発生は、空洞左側面の下方と、右側壁面の上方にそれぞれに見られる。また、亀裂の発生要因は、引張が卓越的であることが分かる。



赤色線	せん断により発生した新規亀裂を示す。
青色線	引張により発生した新規亀裂を示す。
赤/青色線が黒色に変化した線	亀裂発生後、不連続面にせん断変位や剥離が生じたことを示す。

図一九 解析結果(岩盤内の亀裂発生・進展状況)

### (4) 考察

図一七に示した模型実験の結果と図一九に示した解析結果を比較すると、模型実験の結果に見られる空洞右下部の亀裂発生は解析の結果には見られないものの、空洞左下部と右上部に見られる亀裂の発生箇所はほぼ一致していることが分かる。また、亀裂の発生方向においても両者は類似の傾向を示しており、潜在面定義の判断が概ね適切であったと考えられる。

## 5. 地下空洞の掘削問題への適用

岩盤構造物の変形挙動や安定性の評価に対する本解析手法の有効性を、不連続性岩盤内に立地する地下発電所の掘削問題に適用して考察する。

### (1) 解析例の概要

解析の対象は、天盤部が地下400mに位置し、高さ50m、幅25mの弾頭型地下発電所空洞である。解析モデルを図一〇に示す。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、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。岩石基質部の力学的特性を表一五に示す。また、室内力学特性試験<sup>9)</sup>の結果より不連続面にはCoulombモデルを適用するものとし、その物性値を表一六に示す。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 $K_0=0.6$ の初期地山応力分布を再現後、無支保の状態では、各掘削段階では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10ステップを順次掘削した。

第5ベンチ掘削完了時において不連続面が剥離している箇所を図一11に示す。これより、掘削により形成された内空間位置において崩落可能な岩塊ブロックの形成が全く見られないことから、空洞は安定していると考えられる。

## (2) 潜在面の定義

潜在面は、解析的な方法を適用した上でさらに比較的客観性のある判断を加えて定義した。まず、潜在面の定義領域は、図一12(a)に示す弾塑性解析から得られた塑性発生領域を包括する範囲とする。次に、その方向は、図一12(b)に示す主応力の分布に基づき、図一12(c)に示すように空洞周囲で主軸の方向を一様と見なした5つの区域を仮定した。ここで、側壁は、一般にせん断破壊による滑りの発生が潜在的であると考え、せん断による滑り破壊が再現できることを優先的に考慮して破断角を適用した。これより、左右の側壁では最大主応力面からの破断角( $45^\circ + \phi/2$ )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 $65^\circ$ と評価される。一方、天盤部は、一般に引張破壊による落盤の発生が潜在的であると考え、天盤部での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とは前章でも述べたが、ここでは、側圧係数の大きさによらず引張による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。ここで、解析結果として得られる亀裂発生要因と優先的に考慮した亀裂発生要因が必ずしも一致する必要は無く、新規亀裂の発生・進展に起因する破壊現象の再現には何ら支障が無いと考えることは前章で示した亀裂発生・進展解析と同様である。

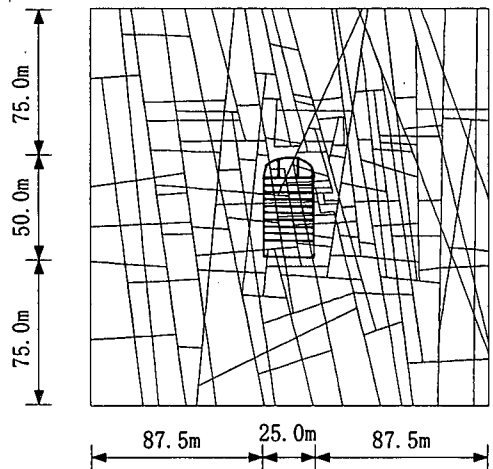
以上に基づき、図一10に示した解析モデルに対して図一13に示すような亀裂発生・進展を表現できる解析モデルを構築した。ここで、図一12(c)に示した各区域では、潜在面の最外郭は既存の不連続面に一致するように定義した。

表一五 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 <sup>3</sup> )
粘着力	1.00 (MPa)
内部摩擦角	40.0 (°)
引張強度	3.50 (MPa)

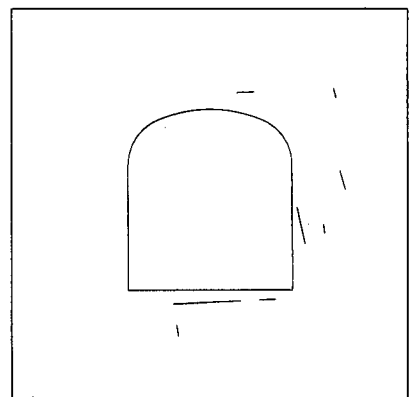
表一六 空洞周辺岩盤の物性値 (既存の不連続面)

垂直剛性 ( $K_n$ )	1000.0 (GPa/m)
せん断剛性 ( $K_s$ )	0.8 (GPa/m)
粘着力 ( $c_j$ )	0.0 (MPa)
摩擦角 ( $\phi_j$ )	30.0 (°)
引張強度 ( $\sigma_{tj}$ )	0.0 (MPa)



(基質部+既存不連続面 / 空洞形状は黒太線で表示)

図一10 地下発電所空洞の解析モデル



図一11 既存不連続面の剥離箇所

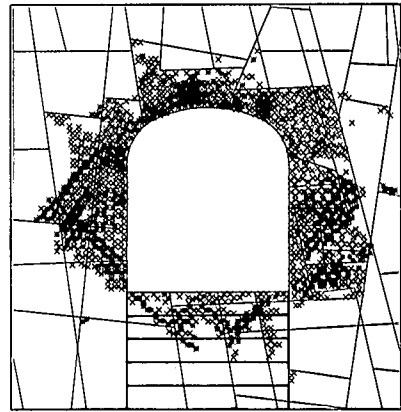
### (3) 亀裂発生・進展解析の結果と考察

図-13に示した解析モデルに対して、アーチ部に続きベンチ部の掘削を実施した。亀裂の発生を規定するパラメータ  $c$ 、 $\phi$  および  $\sigma_c$  には、表-5に示す粘着力、内部摩擦角、引張強度をそれぞれ適用する。アーチ部における各掘削ステップ完了時点での周辺岩盤の亀裂発生・進展状況を図-14(a)に示す。また、図-14(b)には既存の不連続面および顕在化した潜在面のうち、剥離の状態にある箇所を複合的に示す。これより、掘削時に形成された内空面や既存不連続面あるいは発生した亀裂から構成される面を境界とする崩落可能な岩塊ブロックがアーチ右上部と左上部にそれぞれ新たに形成されていることから、天盤部での危険箇所が予測できたとと言える。図-15に、第5ベンチ完了時での周辺岩盤の亀裂発生・進展状況を示す。これより、掘削前には天盤部に上述の崩落可能な岩塊ブロックが存在しないと考えられる岩盤であっても、アーチ部掘削完了時点で崩落可能な岩塊ブロックが新たに形成され、その箇所でも崩落が発生していることが分かる。また、側壁部で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を示すものと考えられる。次に、表-7に、岩石基質部の破壊様式を亀裂の発生・進展とした場合の結果(図-15)と塑性ひずみの発生を伴い連続性を維持して破壊を表現する弾塑性体とした場合の結果(図-11)における空洞壁面位置での変位の比較を示す。これより、前者による場合は後者による場合に比較して3~5倍の内空変位が得られていることが分かる。これは、亀裂発生・進展を考慮した場合は内空壁面付近の岩石基質部に新規亀裂が多数発生し、不連続体としての挙動が卓越したことによると考えられる。

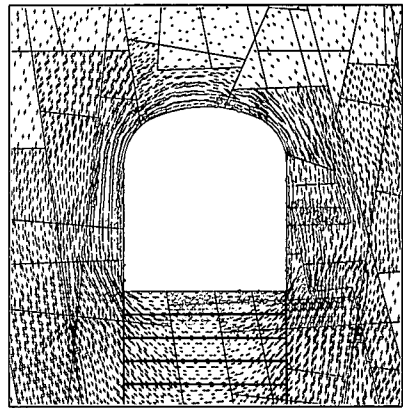
以上より、自然状態(既存不連続面)の不連続面の分布からは破壊の発生が判断できない場合であっても、より合理的、客観的に潜在面を定義した本解析手法を適用すれば、亀裂の発生に起因する変形挙動や破壊メカニズムの再現が可能となり、実設計に役立つ情報を提供することが期待できる。

## 6. 結論

本論文は、著者らが先に提案した不連続性岩盤における既存不連続面のせん断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・進展を個別要素法で表現できる解析手法に対し、潜在面を適切に定義する必要性からその客観的・合理的な定義方法を提案した。次に、解析手法の実用性を

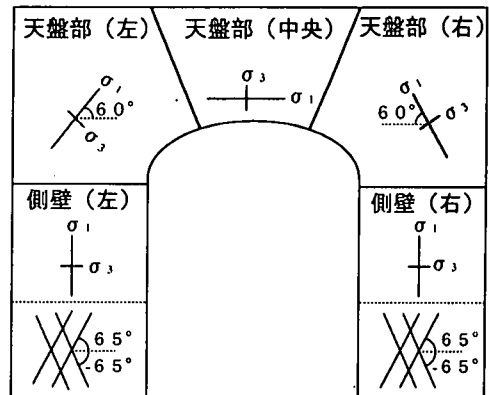


(a) 塑性領域 (空洞形状は黒太線で表示)



(◇は引張応力発生箇所 / 空洞形状は黒太線で表示)

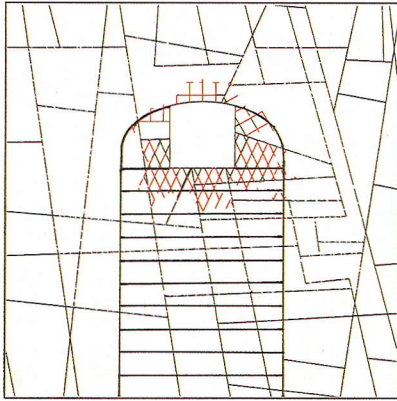
(b) 主応力ベクトルの分布



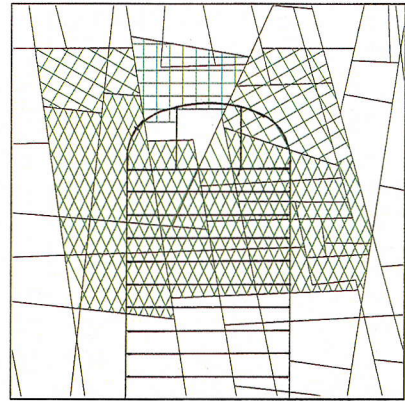
(c) 区域化された主応力ベクトルと潜在面の方向

図-12 潜在面の定義プロセス



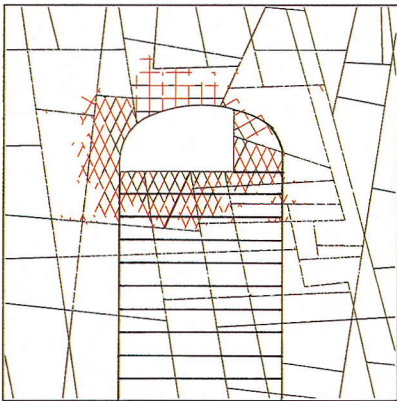


(掘削ステップ 1)

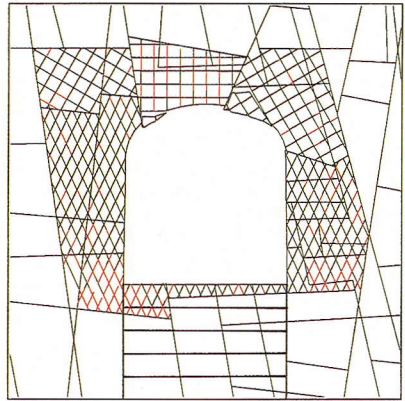


(潜在面は綠色線で表示 / 空洞形状は黒太線で表示)

図-13 亀裂発生・進展解析のモデル



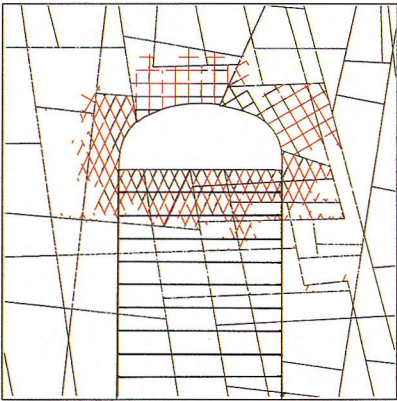
(掘削ステップ 2)



赤色線	せん断により発生した新規亀裂を示す。
青色線	引張により発生した新規亀裂を示す。
赤 / 青色線が黒色に変化した線	亀裂発生後、不連続面にせん断変位や剥離が生じたことを示す。

(空洞形状は黒太線で表示)

図-15 5段ベンチ掘削完了時の亀裂発生・進展状況

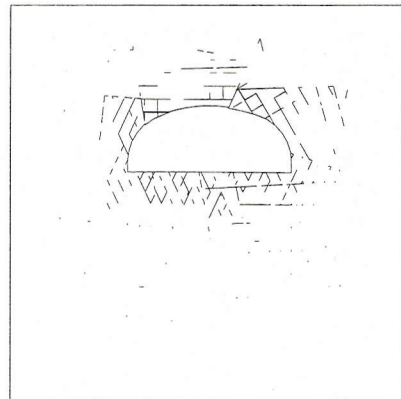


(掘削ステップ 3)

赤色線	せん断により発生した新規亀裂を示す。
青色線	引張により発生した新規亀裂を示す。
赤 / 青色線が黒色に変化した線	亀裂発生後、不連続面にせん断変位や剥離が生じたことを示す。

(空洞形状は黒太線で表示)

(a) アーチ部掘削による亀裂の発生・進展状況



(b) 岩盤不連続面の剥離箇所 (掘削ステップ 3)

図-14 アーチ部掘削による周辺岩盤の破壊状況

検証するために、底面摩擦模型実験の結果と比較して、亀裂発生箇所や発生方向において良好な一致が得られた。以上に基づき、本解析手法を地下空洞掘削解析に適用して亀裂発生に起因する変形挙動や破壊メカニズムを再現し、実際現象をより直接的に表現する本解析手法の岩盤挙動解析としての有効性を示した。今後は、ロックボルトやPSアンカーなどを導入し、岩盤の局所的な破壊を考慮した支保設計という点で本解析手法の有効性を検討する予定である。さらに、斜面、基礎などの他の岩盤構造物を対象とした場合の有効性の検討、亀裂発生を考慮した浸透問題、3次元問題への拡張などを試みる予定である。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) Obara, Y., Yamabe, T., Shimizu, Y., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T.: Elastoplastic analysis by cracked triangular elements, Proc. Int. Conf. on FEM, Shanghai, pp. 756-760, 1982.
- 3) 山辺 正, 尾原祐三, 市川康明, 川本朋万: 誘導異方性を有する地盤の弾塑性解析, 土木学会論文集, 第388号/III-8, pp. 95-102, 1987.
- 4) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素法解析, 土木学会論文集, 第360号/V-3, pp. 3-12, 1985.

表-7 空洞内空壁面変位の比較

変位の計測位置		岩石基質部のモデル化	亀裂発生・進展	弾塑性体
		天盤部中央 (沈下)		-158.6
側壁部中央 (水平変位)	右側		-86.1	-28.1
	左側		86.1	17.3

単位は(mm). 符号は方向を表わす.

- 5) Kastnar, H. (金原 弘訳): トンネルの力学, 森北出版, 1974.
- 6) 大西有三, 河野正雄: ボロノイ分割法を適用した岩盤の個別要素解析について, 土木学会論文集, 第376号/III-6, pp. 231-239, 1986.
- 7) 竹内則雄, 霜鳥大介, 小出 仁, 安井将文, 河野 愛: 断層に関するせん断実験の離散化解析, 日本計算工学会計算工学講演会論文集, Vol. 3, No. 3, pp. 915-918, 1998.
- 8) 棚橋由彦, 蔣 宇静, 足立順一, 山口耕平: 底面摩擦試験装置を用いた不連続性岩盤内大規模地下空洞の変形挙動と安定機構の解明, 平成11年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. 462-463, 2000.
- 9) 蔣 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.

(2000. 4. 28 受付)

## A STUDY OF APPLICABILITY OF EXTENDED DISTINCT ELEMENT METHOD WITH GENERATION AND PROGRESS OF CRACKS IN DESIGN OF ROCK MASSES STRUCTURES

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, a new approach is proposed for modeling generation and progress of cracks due to shear and tension failure in the matrix by using distinct element method. Next, applicability of the approach are verified by means of comparison with experimental results by using base friction modeling apparatus. As applications to field problems for discontinuous rock masses, simulation of underground opening excavation is carried out.