

大規模地下空洞の掘削施工に伴う力学的挙動の評価 MECHANICAL BEHAVIOUR OF LARGE UNDERGROUND OPENING IN DISCONTINUOUS ROCK MASSES

蒋 宇静**・棚橋 由彦**・中川光雄***・溝上 建****

Y.JIANG, Y.TANABASHI, M.NAKAGAWA and T.MIZOKAMI

Deformation and failure mechanism of rock masses are governed by the characteristics of geometrical distribution of discontinuities and the mechanical behavior of a single joint. It is thought that stability of rock structures extremely depend on not only the existing discontinuities but also new cracks due to loading or excavation. This study presents a rational approach to define the generation and progress of the potential cracks due to shear and tension failure in the matrix by using distinct element method (DEM). Excavation simulation of a deep underground opening in the discontinuous rock masses is carried out and the deformational behavior and stability of the surrounding rock masses are discussed in detail.

Key words : discontinuous rock masses, underground opening, new crack, stability, DEM

1. はじめに

数多くの施工例によれば、岩盤内にトンネルや地下空洞を掘削すると周辺地山は変形し、場合によってはゆるみによって崩壊を生じることもある。この変形と崩壊は既存の不連続面のみならず、掘削に伴う応力の局所的集中による新規亀裂の発生・進展に大いに支配されることが現場計測などにより判明されている。したがって、大規模岩盤空洞を安全かつ経済的に建設するには、既存不連続面の力学的挙動および新規亀裂の発生メカニズムを正確に知る必要がある。また、大規模空洞の全断面を一度に掘削するのではなく、部分的に掘削し支保を施しながら拡大していくので、周辺地山の挙動を評価するに当たっては施工手順を無視してはならないと考えられる。

岩盤の挙動を評価するために、最近では数値解析法がよく用いられるようになった。数値解析法は、境界条件や地山物性などを変えてのシミュレーションが容易である一方、適切な地山材料モデルの構築がなされないと解析結果の信頼性と実用性が失われる^{1), 2)}。今までは有限要素法を代表とする数値解析が広く用いられているが、取り扱える亀裂などの不連続面の煩雑さ、計算機の容量などの制限あるいは数値解析自体の限界もあり、必ずしも実際の地盤挙動を正確に表現した解析とはいえない。

著者らは、岩盤内構造物の合理的設計と施工に着目し、不連続面を直接モデル化することが可能で取り扱いも容易な個別要素法を基に、新規亀裂の発生・進展による局所破壊も表現できる数値解析モデルを開発し、その妥

キーワード：不連続性岩盤、地下空洞、新規亀裂、安定性、個別要素法

* 正会員 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科

** 正会員 長崎大学教授 工学部社会開発工学科

*** 正会員 (株)CRC 総合研究所課長役 関西支社

**** 正会員 九州電力株式会社 総合研究所主幹

当性を室内模型実験により検証してきた^{3) - 5)}。本研究は更に、提案手法を大規模地下空洞の掘削問題に適用し、掘削に伴う周辺地山の變形挙動と亀裂の発生・進展による局所破壊のメカニズムを解明することを試みる。また、變形挙動と局所破壊に対するロックボルトなどの補強効果について考察を行なう。

2. 拡張個別要素法による局所破壊のモデル化の概要³⁾

通常の個別要素法は、岩盤不連続面を岩塊ブロックの境界面として、同時に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一つである。ところで、数値解析により亀裂発生現象を表現する研究には、定式化により決定した方向に新たな不連続要素を逐次的に生成する方法^{6) - 8)}が見受けられるが、中川ら³⁾は、実用的に現状の個別要素法をそのまま利用し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として予め定義しておく拡張個別要素法を提案した。この提案した手法では、亀裂が発生するまではこの境界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有する。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。また、一旦発生した亀裂は、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、この連続体から不連続体への移行が逐次的な応力再配分を誘起する。この過程で既に亀裂となった不連続面の近傍にある別の潜在面で亀裂の発生条件が満足されたら、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亀裂化を亀裂の進展による局所破壊の表現と考える。

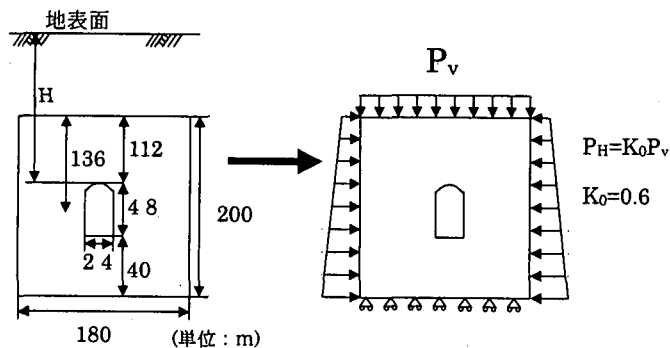
さて、亀裂の発生位置と進展について、基本的には原位置データに基づいて予測すべきである。しかし、原位置データが不明確な場合や収集が不可能な場合は、解析的な予測方法を適用すればよいと考える。さらに、これを適用する上で、比較的客観性のある判断を補助的に用ると有効な場合がある。ここでは予備的な弾塑性解析から得られる主応力の分布に基づいて、主軸の方向を一樣と見なせる区域を岩盤構造物の周辺に設定する。そしてそれぞれの幾つかの区域に対して亀裂発生要因をせん断あるいは引張と判断して発生方向を予測する。まず、亀裂発生要因をせん断と考える場合は、亀裂の発生方向を最大主応力面からの破断角($45^\circ + \phi/2$)と考える。一方、それを引張と考える場合は、亀裂の発生方向を主軸に一致する方向と考える。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る⁹⁾。なお、以上に述べた潜在面の客観的な定義方法を含めた提案手法の信頼性と実用性は、底面摩擦模型実験装置を用いた模型実験により検証されていた^{4), 5)}。

3. 大規模地下空洞の掘削に伴う周辺地山の變形挙動と安定機構

3.1 解析モデルについて

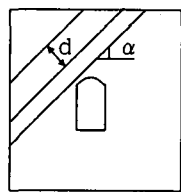
本研究では、深部地下に位置し、高さ 48m、幅 24m の弾頭型地下発電所空洞の掘削問題を対象とする。解析モデルを図-1 に示す。解析領域は、一般に圧縮応力場における岩盤の大變形領域が空洞近傍に集中することから、空洞縦寸法の約 4 倍を対象と考えて 180m×200m とした。空洞周辺の岩盤は、砂岩を中心として新鮮、堅硬かつ風化の少ない岩盤である。また、鉛直方向を中心とする比較的連続した不連続面群と、水平方向を中心とする比較的不連続な不連続面群が卓越している。地山材料の力学的特性は、著者らが提案した解析手法の妥当性を検証するために実施した模型実験材料の特性値から、応力相似則に基づいて算出した^{4), 5)}。なお、実際の地山の特性値については現場から採取してきた供試体を用いて室内試験（三軸圧縮試験、一軸圧縮試験、圧裂引張り試験）を実施することにより求められる。

不連続面のせん断強度が一面せん断試験を行うことにより求められるが、垂直応力制御による一面せん断試験



(a) 想定地盤モデル

(b) 境界条件



(c) 不連続面の状態

H: 地表面から空洞中心までの距離
 P_H : 側方圧力 P_v : 上載圧力
 α : 不連続面角度 K_0 : 側圧係数
 d : 不連続面間隔

図-1 対象とする地山モデル

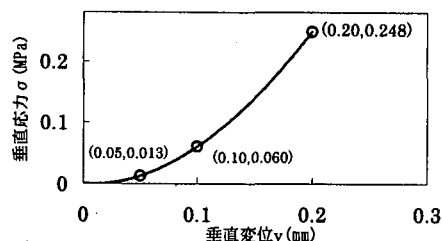


図-2 垂直载荷における不連続面の变形挙動

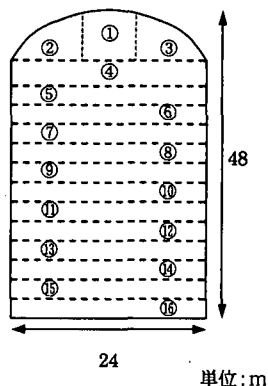


図-3 ベンチカット掘削順序

では、せん断面積がせん断過程において一定となるように、下箱（固定）を上箱（せん断移動）より大きく製作した。また、不連続面の垂直剛性 K_n を求めるため、垂直载荷試験を行う。実験結果によれば、垂直荷重と垂直変位の間に非線形性を示すことがわかる^{4), 5)}。解析では、不連続面の垂直剛性の非線形性を再現するために、垂直荷重-垂直変位の関係曲線を幾つかの折れ線区間に分けてそれぞれの垂直剛性値を求めて入力する（図-2 を参照）。以上のように得られた結果を整理すると、解析に用いる岩石基質部と不連続面の特性値は表-1 に示すようになる。

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、無支保の状態で各掘削段階で平衡状態を保ちながら、アーチ部から順次盤下げ掘削を行なう（図-3）。アーチ部は①中央、②左、③右の順序で掘削する。

3.2 岩盤不連続面の分布形態と評価

まずは基礎的検討として、卓越方向を有する不連続面群は1つとし、規則的で平行なもの（セット1）とする。それにほぼ直交したセット2の間隔がランダムであるとする。さらに、セット1の方向または幅を変化させ、数十パターンの解析を行ったが、本文では卓越したセット1の傾斜角を 60° と設定したケース（図-4 を参照）を例とし、解析結果の考察を行なう。

自然岩盤内の不連続面の分布や形状は複雑であり、定量的評価には確率統計学的手法が一般的であるが、その精度は確

表-1 解析パラメータ

岩盤基質部

特性	値
密度 ρ (g/m ³)	2.5
粘着力 c (MPa)	2.555
摩擦角 ϕ (deg.)	34
ヤング係数 E (MPa)	7.421×10^3
ポアソン比 ν	0.136
引張強度 σ_t (MPa)	0.9749

不連続面

垂直剛性 K_n (MPa/m)	*
せん断剛性 K_s (MPa/m)	1442.1
粘着力 c_j (MPa)	0
摩擦角 ϕ_j (deg.)	31.2
引張強度 σ_{tj} (MPa)	0

*図-2 を参照

率関数の設定に支配される。一方、異なるスケールを用いた現場観察の結果から、不連続面の分布性状はフラクタル性を有していることが報告されている。フラクタル図形のフラクタル次元を算出する方法は数多くあるが、ボックスカウティング法は簡便でかつ汎用性が高いため広く用いられている。本研究では、掘削前の初期状態における既存不連続面の分布形態と掘削による新規亀裂の発生状況について、ボックスカウティング法を用いたフラクタル次元による定量的評価を試みる。なお、フラクタル次元の計算手順については、まずは、解析対象の図形をイメージスキャナを用いてデジタル化し、正方形セル（360×360 ピクセル）の画像として処理する。つぎに、不連続面は幅1ピクセルの細線で表現し、分布のみに関するフラクタル次元を算出する。

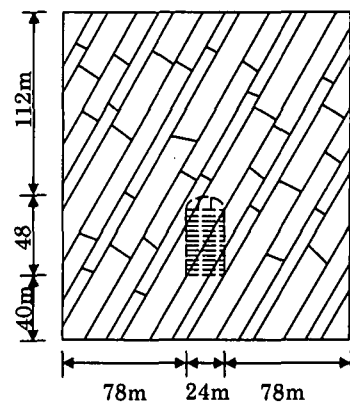


図-4 地山モデル

3.3 掘削シミュレーションと考察

大規模地下空洞の掘削に伴う周辺地山の变形挙動や安定性を解明するために、実際の施工手順と同様に、図-3に示すベンチカット掘削解析と考察を行う。解析領域の境界周囲には、岩盤と同一の物性値を有する地盤を導入した。

(1) 局所破壊を評価するための潜在面の定義³⁾

予備的な弾塑性解析の結果から得られる塑性発生領域を包括する範囲を潜在面の定義域とする。次に、その方向は、主応力の分布に基づいて、主軸の方向を一樣と見なせる区域を空洞の周辺に設定する。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り、破断角の適用は妥当であると考ええる。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 $\phi=34^\circ$ より 62° 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える。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が、ここでは、側圧係数の大きさによらず引張破壊の発生に対応するため、亀裂の発生方向は主軸の方向と考え、この方向に潜在面を定義した。

(2) DEM 弾塑性解析と局所破壊解析との比較

提案手法が通常の DEM 弾塑性解析（不連続面に囲まれるブロックが連続弾性体とする）とどのような違いがあるかを考察するために、深さ $H=158\text{m}$ の場合の弾塑性解析と亀裂の発生・進展解析を実施した。空洞周辺地山の塑性破壊の比較を図-5に、また天盤部および側壁部における变形挙動の比較を図-6に示す。

盤下げベンチ掘削過程での塑性破壊部位と領域はほぼ同じように見える。しかし、天盤部においてはアーチ部掘削完了時点で引張り破壊によるキープロックを形成する岩塊が出現し、そこで崩落が発生していることが分かる。盤下げ6段ベンチ完了時点から、側壁の中央部においてせん断および引張り破壊による新規亀裂が発生し、それが壁面まで進展して、小さいながら空洞内に滑り出そうとするキープロックが形成され始めた。さらに盤下げ掘削に伴って亀裂の発生が拡大しており、奥部まで進展していく現象が見られる。それによる一定規模の滑り破壊の可能性を示すものと考えられる。

全断面掘削完了時点での周辺地山の变形挙動の比較によって2つの解析方法の違いを明らかにすることができた。特に、側壁部のすぐ近傍において、提案方法による解析では、キープロックが滑り出して変位が著しく

表-2 支保工および付着特性

ロックボルト

密度	(g/cm^3)	6.083
ヤング率	(MPa)	1.9×10^5
圧縮降伏強度	(MN)	1.55
引張降伏強度	(MN)	1.55
引張破壊ひずみ		0.035

グラウト材

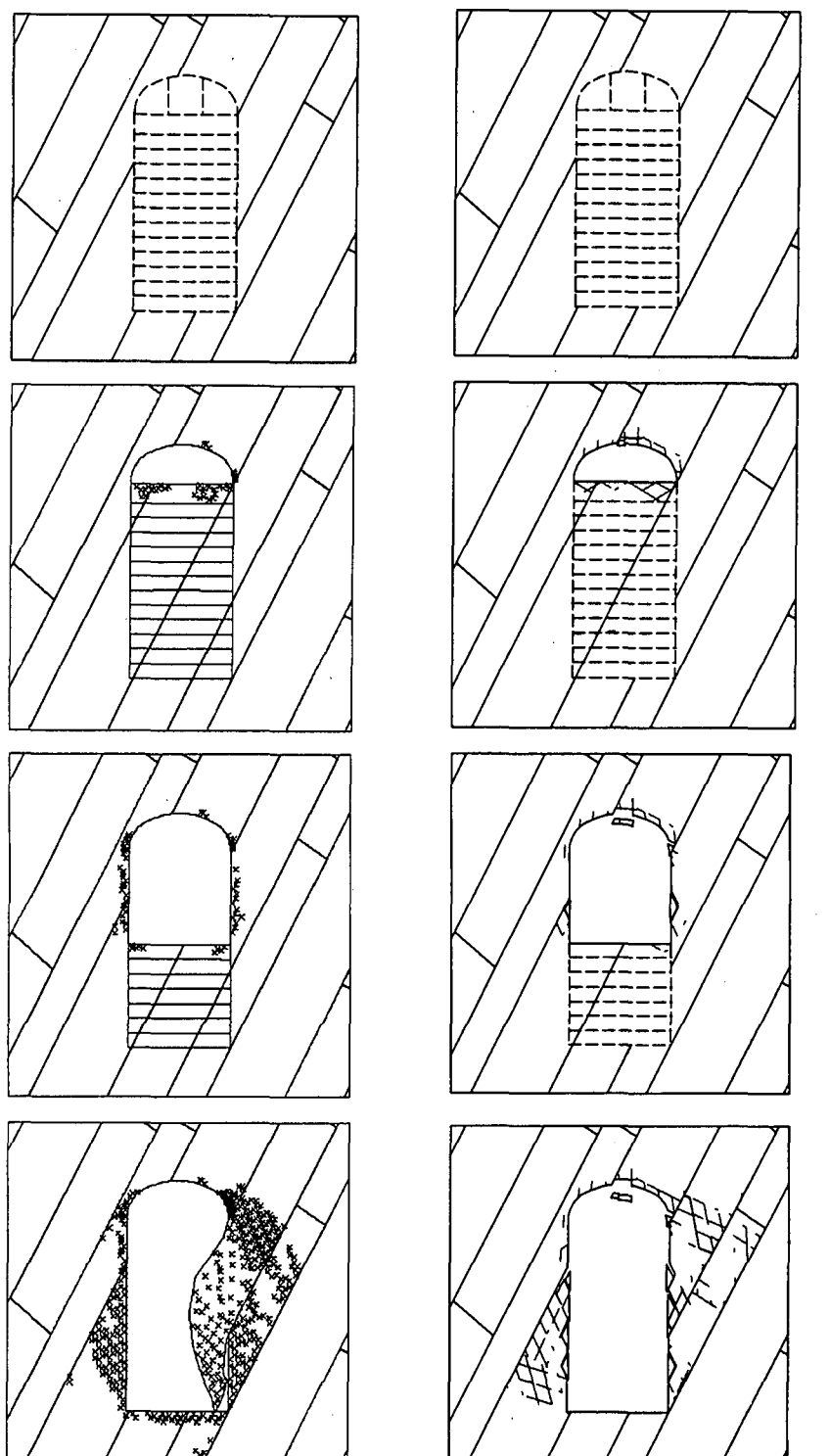
せん断剛性	(MPa)	1.8×10^2
せん断強度	(MN/m)	0.6

発生しているのに対して、DEM弾塑性解析では変位が収束している結果となっている。天盤部も同様な傾向にある。つまり、亀裂発生・進展を考慮した場合は、内空壁面附近の岩石基質部に新規亀裂が多数発生して、内空への変位量を増大させたと考えられる。

以上より、自然状態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。

4. ボルトによる補強効果の解析的考察

大規模地下空洞の安定性に対するケーブルボルト⁹⁾などの支保効果について、検討を行う。ボルトの配置については3パターンを考えて支保効果を比較する。まず、支保工のパターン①(以後、支保①)として、長さ5mのロックボルトを1.5m間隔でアーチ部、側壁部に配置し、パターン②

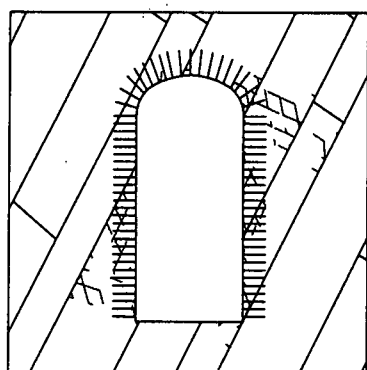


図中の×印は塑性状態を表す

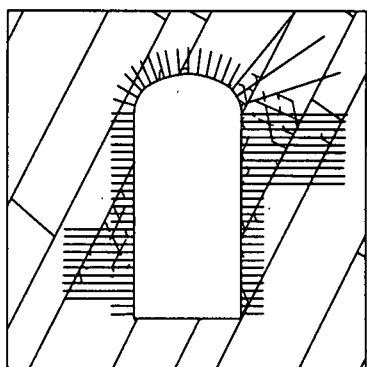
—— せん断破壊

—— 引張破壊

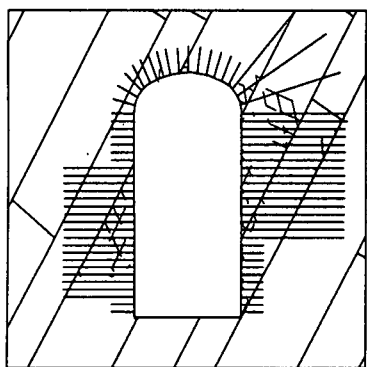
図-5 DEM弾塑性解析と亀裂進展解析の比較(深さH=158m)



(支保①)

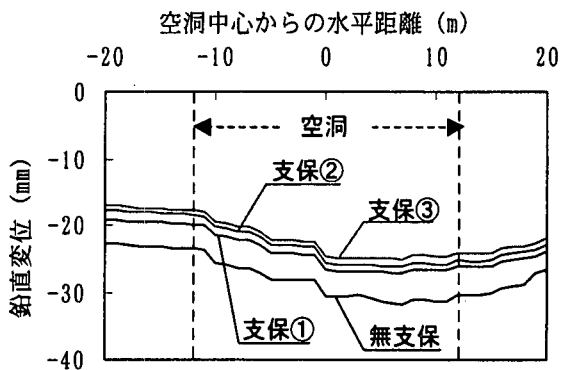


(支保②)

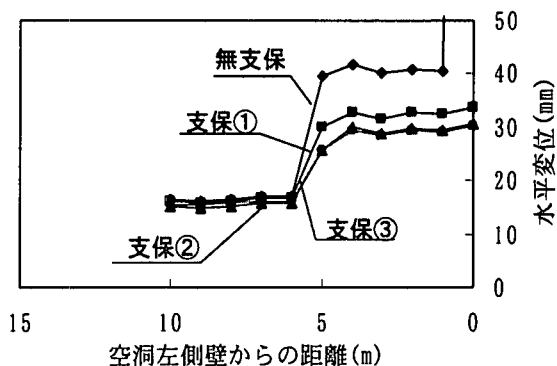


(支保③)

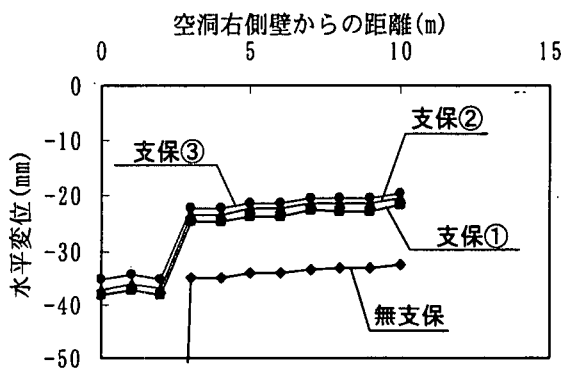
図-7 支保パターンと安定性の関係



(a) 空洞上部 2m における鉛直変位



(b) 空洞左側壁における水平変位



(c) 空洞右側壁における水平変位

図-8 支保パターンと変形挙動の関係

(以後、支保②)は空洞右上部と空洞左下部に生じる局所破壊を考慮して、ボルトの長さを変化させた。またパターン③ (以後、支保③)は支保②と同様にボルトの長さを変化させるがボルトの本数を増し、その数はブロックのすべりうる範囲に対して決定した。ボルトの打設はすべてのパターンで空洞壁面に垂直とした。また、ボルト・グラウト材の物性値は既往研究成果を参考に決定し、表-2に示す。

図-7に支保パターンと塑性破壊の発生状態との関係を、図-8に周辺地山の変形挙動の比較を示す。図-5と図-7を比べると、支保を用いているにもかかわらず亀裂発生箇所に変化はなく、新規亀裂の発生頻度が

減少したことが分かる。これはボルトが変形に応じて軸力を発生させ、新規亀裂の発生と進展に対する抑制効果を発揮したためと考えられる。しかし、空洞右側の支保②がブロックの滑りを支保①より効果的に抑制することができた(図-8)。一方で、支保③の効果について支保②との違いは微少ではあるが、空洞右側壁においてその傾向が見られる。これは左側壁部においては不連続面が空洞に対し差し目になっており、逆に空洞の右側壁部では流れ目になっていることが関係していると考えられる。また、地山全体の新規亀裂の発生密度と天盤部の変形抑制効果には若干の差が見られ、局所破壊の抑制にボルトの打設長さや打設密度(空洞断面内における壁面上の打設間隔)が寄与しているものの、空洞の側壁における新規亀裂の発生箇所や内空変形に対する抑制効果にはその差があまり確認できなかった。

この結果からは次のことが言えるであろう。つまり、既存不連続面の分布形態と岩石基質部の強度特性にもよるが、掘削に伴う周辺地山の局所破壊と変形を抑制するために、合理的なボルト打設パターン(長さ、間隔、角度など)が存在しうる。これに関して、今後は詳細な検討を進めて行く予定である。

5. まとめ

本研究は、既存不連続面のみならず新規亀裂の発生も考慮できる拡張個別要素法の特徴を述べた。大規模地下空洞の掘削解析に適用して亀裂発生・進展による局所破壊に起因する変形挙動や破壊メカニズムを再現し、本解析手法の岩盤挙動解析としての有効性を示した。また、ロックボルトとケーブルボルトは、空洞壁面変位の抑制や局所破壊域の縮減としての支保効果が期待できるが、既存不連続面の分布性状に大きく支配されること、また合理的打設パターンが存在しうることを解析により明らかにした。今後は、ボルトの支保効果と不連続面の分布特性との相関関係の解明、また、吹付けや覆工の変形・強度特性に着目して設計における解析手法の有効性と改善について、実問題への適用により更に検討を重ねていく。

謝辞：解析と実験に際して、大学院博士後期課程肖俊氏、修士課程山口耕平氏および平成11年度修士課程修了生足立順一氏(現在は西松建設に勤務)には大きな協力を得た。ことに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川本眺万：岩盤力学の回顧と展望、土木学会論文集，No. 457/Ⅲ-21，pp. 1-12，1991.
- 2) 打田靖夫：現場計測に基づく不連続性岩盤の変形挙動に関する研究，徳島大学学位論文，1999.
- 3) 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.
- 4) 蔣 宇静，棚橋由彦，肖 俊，山口耕平，江崎哲郎：局所破壊を考慮した岩盤構造物の安定性評価について，第21回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，2000.
- 5) 蔣 宇静，棚橋由彦，肖 俊，中川光雄：大規模地下空洞の掘削に伴う局所破壊の実験及び解析的検証，第31回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，2000.
- 6) 山辺 正，尾原祐三，市川康明，川本眺万：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.
- 7) 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/Ⅲ-3，pp. 3-12，1985.
- 8) 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.
- 9) 木梨秀雄他：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. 53，1996.