

DEM/FDMカップリング解析による大規模 地下空洞掘削時のAE挙動シミュレーション

田坂 嘉章¹・黒瀬 浩公¹・森岡 宏之²・南 将行²・前島 俊雄²・Ming Cai³

¹ 正会員 東電設計株式会社 技術開発本部 構造・耐震技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)
E-mail: tasaka@tepsco.co.jp

² 正会員 東京電力株式会社 建設部 (〒110-0011 東京都千代田区幸町 1-1-3)

³ 正会員 Geomechanics Research Center, MIRARCO, Laurentian University
(933 Ramsey Lake Road, Sudbury, Ontario, Canada, P3E 6B5)

高地圧下の地下空洞掘削では、応力再配分過程で周辺岩盤に分布する既存亀裂の開口、進展および新規亀裂の発生によりゆるみ領域が形成されと考えられている。本研究では、岩盤内の応力変化に対する指標としてAEに着目し、室内岩石試験のAE挙動を個別要素法(DEM)により再現することで、AE発生メカニズムとして亀裂の発生、進展が支配的であることを示した。

このAE発生メカニズムの概念に基づいて、神流川地下発電所空洞におけるAEセンサー設置位置近傍の岩盤をDEMでモデル化し、それ以外の空洞周辺岩盤全域を有限差分法(FDM)でモデル化するカップリング解析による掘削解析を実施した。その結果、空洞掘削時のAE発生、岩盤内応力伝播および岩盤破壊のメカニズムが亀裂の発生、進展に起因することを示した。

Key Words : AE(Acoustic Emission), underground rock cavern, DEM, FDM

1. はじめに

AE(Acoustic Emission)は、岩盤の破壊に先立って発生することが知られており、原位置にてAE測定を行い、微小破壊の発生箇所と破壊規模を明らかにすることにより、岩盤の破壊を事前に予測できることから、これまで地下空洞掘削時の計測管理や安定性監視に適用されている¹⁾。

高地圧下の地下空洞掘削では、応力再配分過程で周辺岩盤に分布する既存亀裂の開口、進展および新規亀裂の発生によりゆるみ領域が形成されと考えられ、これらのメカニズムを解明することで、空洞の安全管理、支保設計に重要となる岩盤応力に着目した合理的な情報化設計施工体系の構築が可能になると思われる。

そこで本研究では、岩盤内の応力変化に対する指標としてAEに着目し、まず、AEの発生ならびに岩盤破壊のメカニズム解明を目的に、室内岩石試験のAE挙動を個別要素法(DEM)により再現した。次に、神流川地下発電所空洞におけるAEセンサー設置位置近傍の岩盤をDEMでモデル化し、それ以外の空洞周辺岩盤全域を有限差分法(FDM)でモデル化するカップリング解析による大規模地下空洞掘削解析を実施し、空洞掘削時のAE発生、岩盤内応力伝播および岩盤破壊のメカニズムについ

て検討を行った。

2. 室内岩石試験のAE挙動シミュレーション

岩石のAEは、亀裂の発生、進展および節理のアスペリティの破壊により生じると考えられている。本研究では、AE発生メカニズムとして亀裂の発生、進展が支配的であることを明らかにするため、DEMによる室内岩石試験のAE挙動シミュレーションを実施した。

(1) DEM解析

室内岩石試験のAE挙動シミュレーションに用いた解析コードは、Itasca社のPFC^{2D}(2 Dimensional Particle Flow Code)である²⁾。PFC^{2D}は、円形平板(粒子と呼ぶ)の集合体により岩石、岩盤を表現する粒状体の剛体個別要素法の解析コードである。剛体の粒子は個別に動いて、接触による相互作用を生じる。岩石供試体は接触した粒子を接着(ボンド)した粒子集合体によりモデル化した。接触した法線およびせん断方向剛性は粒子集合体の巨視的変形特性に影響を及ぼし、ボンドの引張強度、せん断強度は粒子集合体の巨視的強度を決定する。

法線方向の引張接触力が法線方向の引張強度以上でボ

ンドは破壊し、接触力は消滅する。また、せん断方向の接触力がせん断強度以上でボンドは破壊し、その後はせん断力が摩擦限界を超えない限り、接触力は変化しない。

本研究では、上記のボンドの破壊が、岩石の亀裂の発生と等価であると仮定し、この亀裂の発生と室内岩石試験のAE発生数を比較することとした。

(2) 室内岩石試験のAE挙動シミュレーション

神流川地下発電所建設時には、岩石のAE挙動を把握するために、室内三軸圧縮試験が行われている。室内三軸圧縮試験の供試体は、神流川地下発電所空洞の調査横坑で実施された地質調査ボーリングのコアより採取したものであり、直径50mm×高さ100mm（端面仕上がり精度1/100mm）に整形したものをを用いた。

ここでは、岩石供試体の三軸圧縮試験における応力～ひずみ関係をDEM解析により再現し、载荷過程の各段階で亀裂の発生および進展状況、主要な破断面の形成状況を比較した。解析に用いたDEMモデルを図-1に、入力パラメータを表-1に示す。DEMモデルの粒子数は4,772個である。AE挙動シミュレーションでは、室内試験と同様に、拘束圧を10MPaとし、ひずみ速度一定で载荷した。

AE挙動シミュレーション結果のうち、中粒砂岩（Ms-1）の応力～ひずみ関係、ボンドの破壊数（亀裂発生数=AE発生数）を試験結果（AE発生数）と比較して図-2に示す。なお、試験結果にはAE周波数（平均周波数）も示した。AE周波数は、供試体の破壊後に低下し始め、残留状態ではほぼ一定値を示しており、破壊判定の指標になることがわかる。

解析結果は、三軸圧縮試験における応力～ひずみ関係、および破断面の形状を概ね再現できている。解析による供試体内の亀裂は、ピーク強度の約60%の応力レベルで供試体全体に発生し始め、亀裂発生数が急増し、このときから応力～ひずみ関係に非線形性が現れはじめる。その後、载荷が進むにつれて亀裂が進展し、ピーク強度を越えた後に亀裂発生数がピークを迎え、供試体は破断面を形成し、破壊に至っている。このような解析による岩石が破壊に至る亀裂の発生傾向は、試験におけるAE発生数の変化と対応関係にある。

以上のことから、AEの発生メカニズムおよび岩石の破壊メカニズムは、亀裂の発生、進展に起因することが明らかになった。なお、筆者らは不連続面を有する岩石供試体のAE挙動シミュレーションから、AEの発生メカニズムが既存亀裂の進展に起因することを明らかにしている³⁾。

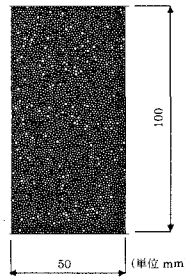
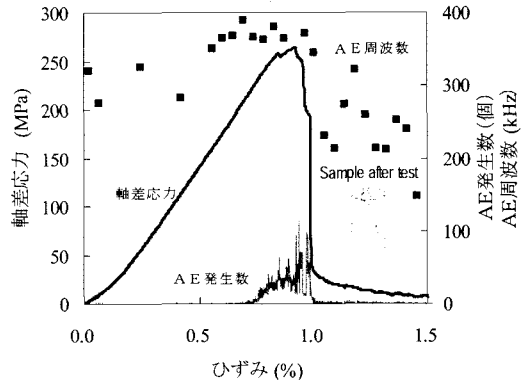


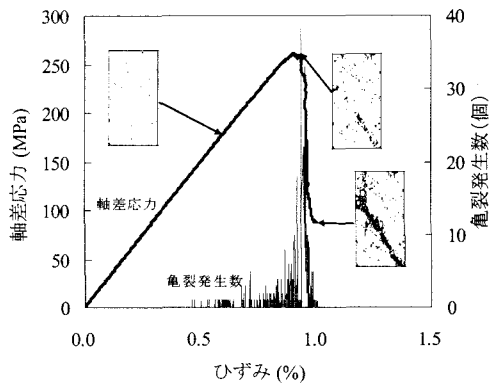
図-1 DEM解析モデル

表-1 DEM解析における入力パラメータ

パラメータ	Ms-1
粒子最小半径(mm)	0.4
粒子半径比	1.66
粒子単位体積重量(kg/m ³)	2.7
粒子間接触ヤング率 k_c (GPa)	20
粒子間弾性比 k_n/k_t	1.5
平行ボンドヤング率 k_p (GPa)	20
平行ボンド弾性比 k_n/k_t	1.5
粒子間の引張強度(MPa)平均値	220
粒子間の引張強度(MPa)標準偏差	22
粒子間のせん断強度(MPa)平均値	150
粒子間のせん断強度(MPa)標準偏差	15
粒子間の摩擦係数	0.5



(1) 試験結果



(2) 解析結果

図-2 室内岩石試験のAE挙動シミュレーション結果

3. 空洞掘削時のAE挙動シミュレーション

空洞掘削時の周辺岩盤におけるAE発生メカニズム、応力伝播メカニズム、岩盤破壊メカニズムを明らかにするため、2.のAE発生メカニズムの概念に基づいて、DEM/FDMカップリング解析による空洞掘削時のAE挙動シミュレーションを実施した。

(1) 神流川地下発電所空洞の地質および計測概要

神流川地下発電所空洞は、土被り約 500m の地下深部に位置し、卵形の空洞形状で、長さ 216m、幅 33m、高さ 52m の規模である。

発電所周辺の地質は、細粒～粗粒砂岩を中心として分布し、礫岩、粗粒砂岩の礫集合体からなる CG 層を鍵層として地層構造が想定され、8 層に区分されている。発電所周辺の岩級は、90%以上が C_H 級となっている。

空洞掘削工事にあたっては、従来の岩盤変位測定などのひずみ量の計測に加え、岩盤応力、AE といった岩盤内の応力状態の計測を実施し、ゆるみ領域に着目した情報化設計施工が実施された¹⁾。

検討の対象とする H 断面の AE 計測配置図を図-3 に示す。AE センサーは H1～H5 の 5 測線について各 12 深度の合計 60 チャンネルで計測された。

(2) カップリング解析の概要

DEM と FDM とのカップリング解析モデルの概念を図-4 に示す。カップリング解析では、解析モデル全体を大変形問題が扱える FDM でモデル化し、AE 計測位置近傍を DEM でモデル化する。なお、FDM 解析コードは Itasca 社の FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)⁴⁾ である。DEM モデルと FDM モデルは別々に作成し、FDM モデルにおいて地質、掘削ステップ等を考慮する。FDM モデルと DEM モデルの境界では、モデル間の相互作用を考慮してカップリングを行う(図-5)。

DEM モデルにおけるボンド要素の破壊を亀裂(AE)の発生とすることにより DEM モデルにおいて AE 挙動を追跡し、掘削過程での AE 発生数が得られる。

(3) 空洞掘削解析条件

解析は図-4 に示すように 15 掘削ステップを考慮した。カップリング解析に用いた空洞周辺の FDM モデルを図-6 に示す。DEM モデルは図-4 に示したとおりである。

解析にあたっては、空洞周辺岩盤をその力学的特性の違いから 8 層に区分した不均質モデルとした。AE センサー位置に設けた DEM モデルの形状は 1.0×1.0m の矩形とした。DEM モデルにおける 1 箇所あたりの円形粒子の総数は 9,447 個である。

初期応力は、対象地点の調査横坑において多軸ひずみ法(オーバーコアリング法)で計測された応力を空洞座標軸に応力変換し、最大主応力を 12.5MPa、最小主応力を 4.8MPa とした。最大主応力の方向は鉛直方向から反時計回りに 26 度傾斜している。また、DEM モデルは、初期応力に対応する水平、鉛直応力で載荷した上で、予めカップリング解析を行い、DEM モデル内の応力を FDM モデルに与えた初期応力と等しくした。

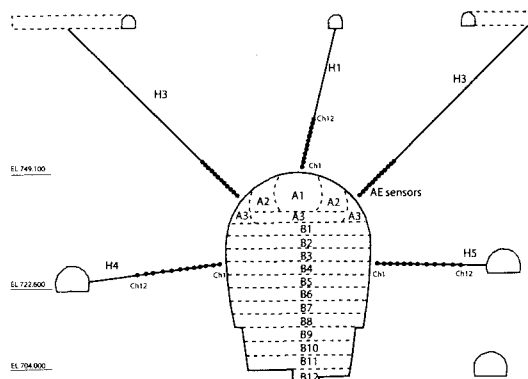


図-3 H断面のAE計測配置図

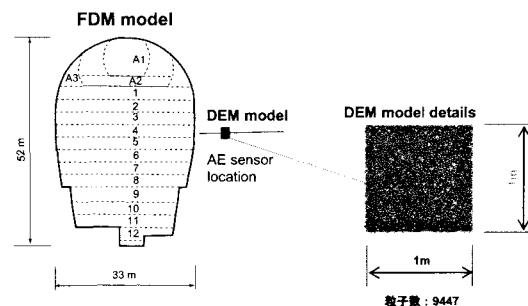


図-4 DEM/FDMカップリング解析モデルの概念

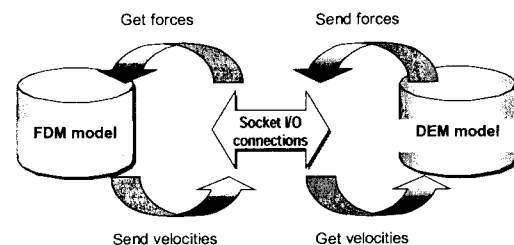


図-5 DEM/FDMカップリング方法

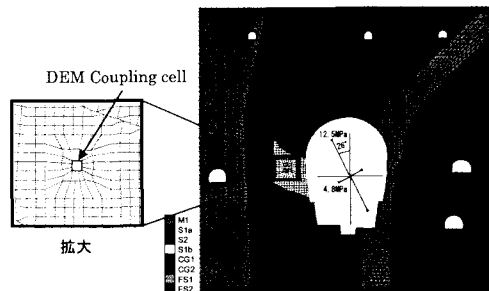


図-6 空洞周辺のFDMモデルと初期応力

(4) 入力パラメータ

岩盤物性については、室内岩石試験結果と現場の岩盤区分を用いて GSI システムにより評価し、原位置試験結果との整合性を確認した⁹⁾。岩盤区分毎の FDM モデルの入力パラメータを表-2 に示す。なお、FDM モデルで

表-2 FDMモデルの入力パラメータ

岩盤 区分	E (GPa)	ν	ピーク強度		残留強度		膨張 角度 (deg)	引張 強度 (MPa)
			σ_c (MPa)	ϕ (°)	σ_r (MPa)	ϕ (°)		
SIa	30	0.25	3.4	57	0.5	49	5	0.4
CG1	60	0.25	4.1	57.8	0.5	49	5	0.6
CG2	60	0.25	3.7	57.5	0.5	49	5	0.6
S2	30	0.25	3.7	57.5	0.5	49	5	0.4
FS1	30	0.25	3.1	56.4	0.5	49	5	0.2
FS2	30	0.25	3.4	57	0.5	49	5	0.4
M1	10	0.25	1.1	41.9	0.5	40	5	0.05
SIb	20	0.25	3.4	57	0.5	49	5	0.4

表-3 DEMモデルの入力パラメータ

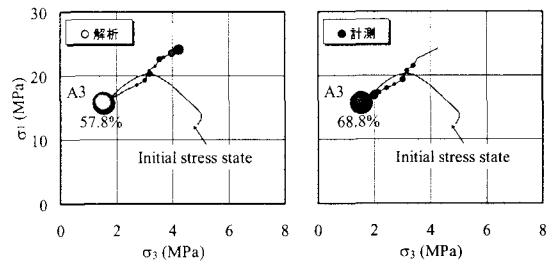
パラメータ	H3 測線 (FS1)	H4 測線 (SIb)
粒子最小半径(mm)	0.4	0.4
粒子半径比	1.66	1.66
粒子単位体積重量(kg/m ³)	2.7	2.7
粒子間接触ヤング率 k_c (GPa)	17	12
粒子間剛性比 k_n/k_s	1.0	1.0
平行ボンドヤング率 k_p (GPa)	17	12
平行ボンド剛性比 k_n/k_s	1.0	1.0
粒子間の引張強度(MPa)平均値	11	13
粒子間の引張強度(MPa)標準偏差	3	4
粒子間のせん断強度(MPa)平均値	22	26
粒子間のせん断強度(MPa)標準偏差	3	4
粒子間の摩擦係数	1.5	1.5

は、岩盤の構成式にひずみ軟化特性を考慮している。また、カップリングを行う DEM モデルの剛性および強度は、岩盤と等しくする必要があることから、予め一軸圧縮試験の数値シミュレーションを行い、応力～ひずみ関係のフィッティングを行うことにより決定した。本論文で示す H3 測線及び H4 測線の A/E センサー位置での岩盤 (FS1, SIb) の DEM モデルの入力パラメータを表-3 に示す。

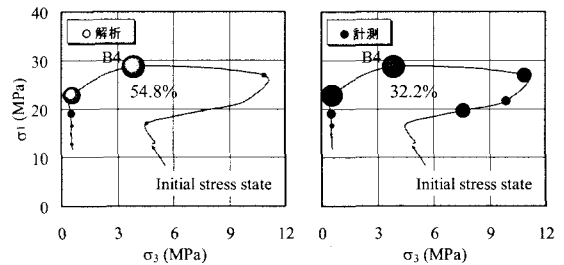
(5) 解析結果

図-3 に示した H3 測線の Ch3 (深度 3.5m) および H4 測線の Ch2 (深度 3.0m) の A/E センサー位置における空洞掘削時の応力経路と DEM/FDM カップリング解析による亀裂発生数を、計測 A/E 発生数と比較して図-7 に示す。応力経路の主応力 σ_1 , σ_3 は、DEM 要素 (カップリング要素) を FDM 要素に置き換えた FDM による掘削解析結果である。円の大きさは、掘削段階毎の亀裂あるいは A/E の発生数である。なお、各掘削段階における亀裂 (A/E) 発生数は、発生数の定義が解析 (亀裂) と計測 (A/E) とで異なることから、掘削開始 (A1) から掘削終了時 (B12) までの総発生数に対する比率で示している。

これらの図から、各 A/E センサー位置でのカップリング解析結果は、亀裂 (A/E) が発生する掘削ステップおよび亀裂 (A/E) 発生率について概ね計測結果を再現している。このことから、空洞掘削時の岩盤の A/E 発生メカニズムについても、2. で示した岩石供試体と同様に、



(1) H3 測線 Ch3 (空洞壁面から 3.5m)



(2) H4 測線 Ch2 (空洞壁面から 3.0m)

図-7 応力経路と亀裂 (解析) および A/E (計測) 発生数の関係

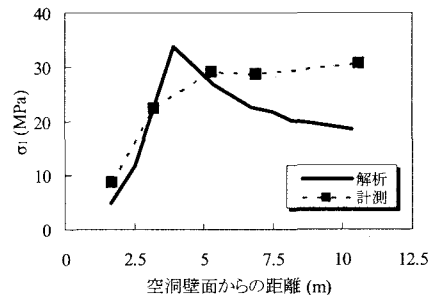


図-8 最大主応力分布 (H3 測線)

亀裂の発生、進展に起因することがわかる。

ここで、H3 測線近傍で A3 掘削終了時に円錐孔底ひずみ法により計測された岩盤応力 (最大主応力) を本検討で用いた FDM による解析結果と比較して図-8 に示す。

計測応力は、空洞壁面から 5m の範囲内で低下しており、A3 掘削時には最大で空洞壁面から 5m の範囲で応力が岩盤のピーク強度を超えて応力再配分が生じていることがわかる。FDM による解析結果は、空洞壁面から 3.5m 以浅で応力低下が見られ、A3 掘削時に空洞壁面から 3.5m 以浅で破壊が発生している。図-9 に示す計測による A/E の平均周波数変化によれば、Ch1～Ch3 センサー位置 (空洞壁面から 1.5m～3.5m) で A3 掘削時に周波数の低下が認められ、岩盤が破壊に至ったものと考えられる。この挙動は計測応力と一致するものであり、FDM による解析結果と対応している。

これらのことから、本検討で用いた FDM による解析は、空洞掘削時の周辺岩盤における応力の変化を概ね再

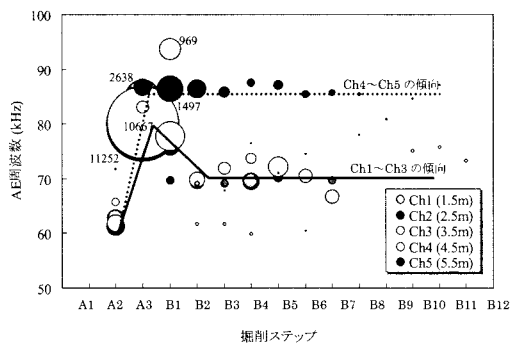


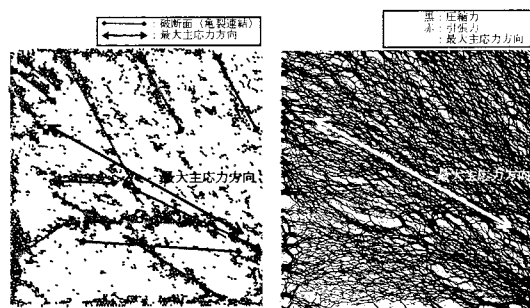
図-9 計測によるAE発生数およびAE周波数の経時変化
(H3 測線 Ch1~Ch5, 空洞壁面から 1.5~5.5m)

現れていることを確認した。

図-10 に H3 測線 Ch3 (深度 3.5m) における空洞掘削終了時の DEM モデル (ミクロモデル) の亀裂分布および粒子間接触力分布を示す。なお、同図には、DEM モデルを FDM モデル (マクロモデル) とした掘削解析で得られた最大主応力方向を併せて示している。接触力分布から、岩盤は圧縮場であり、その圧縮力方向は、マクロモデルの最大主応力方向に対応していることがわかる。亀裂分布から、亀裂が進展、連結して、破断面 (連結した亀裂) を形成していることがわかり、その方向は、最大主応力方向と 15~30 (deg.) 程度の傾斜が卓越し、DEM によりモデル化した領域の岩盤は、巨視的にはせん断破壊が卓越していることを確認できる。また、圧縮場において最大主応力方向と一致する破断面も認められ、局所的なスポーリング破壊³⁾ (岩石供試体の割裂破壊と類似の破壊) も確認できる。したがって、本解析手法の適用により、岩盤の破壊モードが評価可能であるとともに、破断面の発生方向が予測でき、破断面の方向に対応した効果的な支保設計が可能になると考えられる。

次に、空洞掘削時の応力伝播メカニズムを考察するため、図-11 に B4 付近に位置する H4 測線について、Ch1~Ch5 までの各 AE センサー位置におけるカップリング解析から得られた掘削段階毎の増分亀裂分布と、最大主応力分布を示す。B2~B3 の掘削の進行に伴い、空洞壁面近傍 (Ch1) で最大主応力が増加し、亀裂の発生が認められる。さらに B3~B4 と掘削が進行すると、空洞壁面近傍の亀裂が進展、連結し、破壊面が生じて破壊に至ると同時に最大主応力の低下が認められる。この時に、最大主応力分布のピークが岩盤深部に移動する様子が認められる。これらの亀裂発生、進展に伴う岩盤の応力伝播挙動は、Ch2, Ch3 の岩盤においても認められる。

岩盤の破壊メカニズムを考察するため、図-12 に H4 測線 Ch1 (空洞壁面から 1.5m) の各掘削段階における解析による差応力および亀裂発生数と、計測による AE の



(1) 亀裂分布 (2) 粒子間接触力分布
図-10 亀裂分布と粒子間接触力分布
(H3 測線 Ch3, 空洞壁面から 3.5m)

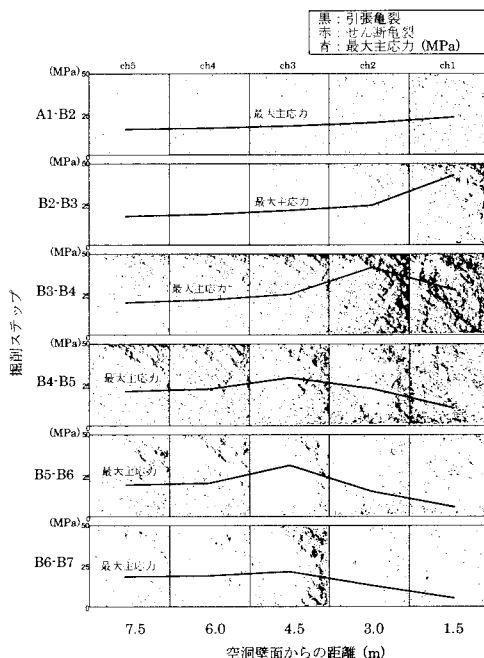


図-11 H4 測線の増分亀裂分布と最大主応力の経時変化
(空洞壁面から 1.5m~7.5m)

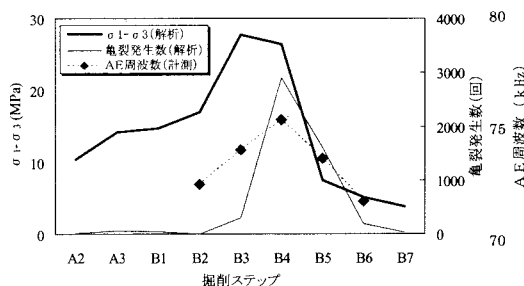


図-12 解析による差応力、亀裂発生数と計測による AE 周波数の経時変化
(H4 測線 Ch1, 空洞壁面から 1.5m)

平均周波数を示す。A2～B2 の掘削の進行に伴い差応力は徐々に増大し、亀裂が発生し始めている。B3 掘削時に差応力は大きく増大して最大値を示し、B4 掘削時に若干低下した後、B5 掘削時に大きく低下する。亀裂発生数は、上記の応力変化に対応して、B3 掘削時に急増し始め、B4 掘削時に最大となり、B5 掘削時に減少する。その後、差応力は徐々に小さくなり、亀裂発生数も収束している。差応力が大きく低下する B5～B6 掘削時には、AE 周波数は低下しており、このときに岩盤は破壊に至ったと考えられる。これらの空洞掘削に伴う岩盤内の応力、亀裂およびAEの挙動は、2. で示した室内岩石試験と同様の傾向を示しており、岩盤の破壊メカニズムは、亀裂の発生、進展に起因することがわかる。

したがって、空洞掘削時の岩盤は、掘削に伴う応力変化により空洞近傍で亀裂が発生し、掘削進行によりその亀裂が進展して岩盤破壊が生じる。そして、破壊による応力再配分が生じて岩盤深部へと応力が伝播し、新たな亀裂が生じるという岩盤の破壊、応力伝播のメカニズムが本解析により明らかとなった。

4. 結論

DEM による室内岩石試験の数値シミュレーションを行い、AE の発生メカニズムが亀裂の発生、進展に起因することを明らかにした。また、神流川地下発電所空洞掘削時の計測AEに基づき、DEM/FDM カップリング解析による掘削解析を実施し、空洞掘削時の周辺岩盤におけるAE発生メカニズム、応力伝播メカニズム、岩盤破壊メカニズムが、亀裂の発生、進展に起因することを明らかにした。

本手法の特徴は、空洞掘削時の周辺岩盤内の応力伝播メカニズムを考慮でき、岩盤の破壊モードの評価が可能なることから、メカニズムに見合ったゆるみ領域の評価、支保パターンの配置が可能であり、岩盤変位より先行して現れるAE挙動の計測と併用することで、合理的な安全管理、岩盤挙動評価および支保設計が可能になると考えられる。

また、本研究により、将来展望として、AE計測、DEM 解析をベースとした新しい情報化設計施工体系構築の見通しを得た。

謝辞：本研究の遂行にあたり、GRC の P. Kaiser 博士、東京電力の工藤奎吾博士から多大なご協力と貴重なご意見を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 前島俊雄, 森岡宏之: 大規模岩盤空洞へのゆるみ領域に着目した情報化設計システムの適用, 土木学会論文集, No.742/VI-60, pp.133-148, 2003.
- 2) Cundall, P. A., and O. D. L. Strack : A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 3) 森岡宏之, 南将行, 前島俊雄, 田坂嘉章, Ming Cai, 青木謙治: AE 計測による大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動評価手法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.791/VI-67, pp.81-96, 2005.
- 4) Cundall, P., and M. Board. : A Microcomputer Program for Modeling Large-Strain Plasticity Problems, in *Numerical Methods in Geomechanics (Proceedings of the 6th International Conference, Innsbruck, Austria, April 1988)*, pp.2101-2108, Rotterdam: A. A. Balkema, 1988.
- 5) Cai, M., P. K. Kaiser, H. Uno, Y. Tasaka, M. Minami : Estimation of rock mass strength and deformation modulus of jointed hard rock masses using the GSI system. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41(1): pp.3-19, 2004.

DEM/FDM COUPLED NUMERICAL SIMULATION OF AE DURING LARGE-SCALE CAVERN CONSTRUCTION

Yoshiaki TASAKA, Hiroki KUROSE, Hiroshi MORIOKA, Masayuki MINAMI, Toshio MAEJIMA and Ming CAI

Excavation of underground openings in high stress ground results in the stress redistribution near the excavations, leading to the formation of excavation damaged zones. In the present study, numerical simulations of rock compression tests using DEM method are carried out and the results are compared to the laboratory test data which includes AE monitoring data. It is shown that crack initiation and propagation is the dominant mechanism that generates AE in the rock samples during loading. This concept is applied to the AE simulation during the excavation of the large-scale cavern of the Kannagawa underground powerhouse. A small DEM model is built to cover an AE sensor or a series of AE sensors to simulate the AE activities recorded during the cavern excavation. The DEM model is coupled with a FDM model which includes the geology and excavation sequence. It is revealed that AE activities generated during cavern excavation, stress propagation and the damage of the rock mass are all attributed to the crack initiation and propagation in the rock mass.