

DEM-FEM 組合せ手法による岩盤地下空洞掘削時の AE 挙動の再現解析

東電設計(株) 正会員 ○黒瀬浩公 田坂嘉章

東京電力(株) 正会員 南将行 森岡宏之 前島俊雄

1. はじめに

岩盤において発生する AE は、その破壊過程と密接な関係があることが知られており、インタクトな岩石に生じる亀裂や、節理性岩盤のアスペリティーの破壊によって生じると考えられている。岩盤や岩石の亀裂の発生や進展を直接的に表現できる数値解析法として個別要素法(DEM)がある。本検討では、AE 発生メカニズムの把握を目的として、まず DEM による室内岩石試験の数値シミュレーションを実施し、次に、DEM と有限要素法(FEM)との組合せ手法により、岩盤地下空洞掘削時の AE 挙動の再現を試みた。

2. DEM 解析による室内岩石試験のシミュレーション

数値シミュレーションに用いた DEM 解析コードは PFC^{2D}¹⁾とした。PFC^{2D}は、粒子の集合体により岩盤を表現する DEM 解析コードである。岩石供試体は、接触した粒子を接着(ボンド)させることにより作成した。図-1に室内岩石試験の供試体モデルを示す。DEM 解析の入力パラメータについては、ピーク強度、弾性係数、ポストピークの脆性挙動等が試験結果を再現するようカーブフィッティングにより決定した。そして、ボンドの破壊が微視的な亀裂の発生と考え、AE 挙動との比較を行った。

細粒砂岩における数値シミュレーション結果のうち、応力および AE 発生数とひずみとの関係を試験結果と比較して図-2に示す。同図より、数値シミュレーション結果はピーク強度、弾性係数およびポストピークの脆性挙動などを良く再現できている。また、供試体の破壊形状についても、試験時に観察されたせん断帯を

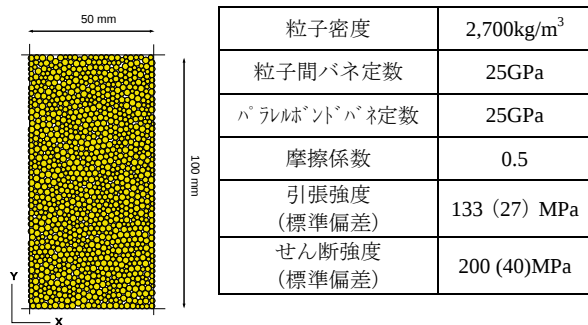


図-1 岩石供試体モデル

よく表現できている。解析による岩石が破壊に至る亀裂の発生は、試験における AE 発生と対応関係にある。したがって、DEM 解析は、岩石に生じる亀裂の発生、進展、破壊までの挙動を再現可能であり、また、AE は主に微視的な亀裂の発生により生じることが確認された。

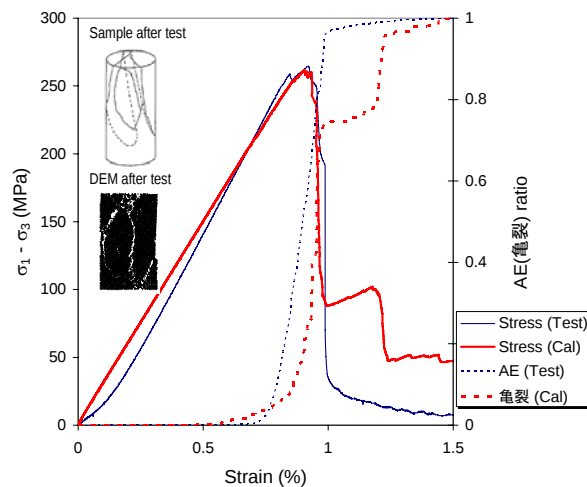


図-2 細粒砂岩における数値シミュレーション結果

3. FEM-DEM 組合せ手法による空洞掘削解析

神流川地下発電所では、空洞掘削時に周辺岩盤の AE 計測が実施されている(図-3)²⁾。ここでは、2章で示した AE 発生メカニズムに基づき、実際の地質条件を考慮した FEM 解析と DEM 解析を組合せた手法により、空洞掘削時の原位置 AE 挙動の再現を試みた。

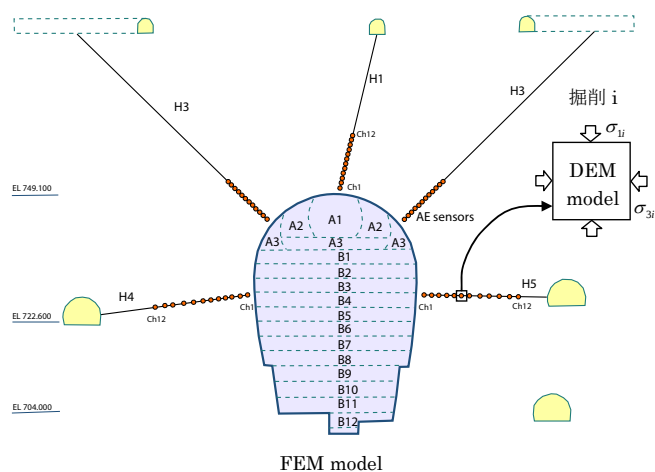


図-3 AE センサーの配置と解析手法の概念

キーワード AE, DEM, FEM, 地下空洞

連絡先 〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3 東電設計株式会社 TEL 03-4464-5594

FEM 解析では、地質、支保及び図-3 に示す掘削ステップを考慮した逐次掘削解析を行い、AE センサー位置の掘削に伴う応力変化（応力経路）を求めた。そして、この応力経路を図-3 に示す要素レベルの DEM モデルの外力として与えた解析により、亀裂発生数を求めた。DEM モデルの寸法は、高周波 AE センサーの最大適用範囲半径(0.5~1m)から1×1mに設定した。FEM 解析は、ひずみ軟化構成則による弾塑性解析とした。

H3 測線チャンネル 7(H3-Ch7)と H4 測線チャンネル 4(H4-Ch4)における FEM 解析による応力経路と、掘削ステップ毎の計測 AE 発生数および解析による亀裂発生数の関係を図-4～図-7 示す。ここで図中の円の面積は、AE 発生数および亀裂発生数の大きさを示している。

これらの結果から、本手法により掘削時の AE 挙動を概ね再現でき、これにより岩石試験の挙動と同様に、亀裂の発生・進展挙動が原位置での空洞掘削時 AE 発生の支配的なメカニズムであることがわかった。ただし、図-7 から、本手法では破壊後の AE 挙動については再現できていない。

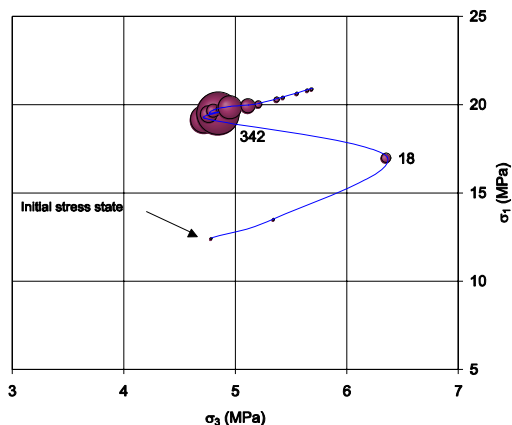


図-4 H3-Ch7 位置の応力経路と計測 AE 発生数

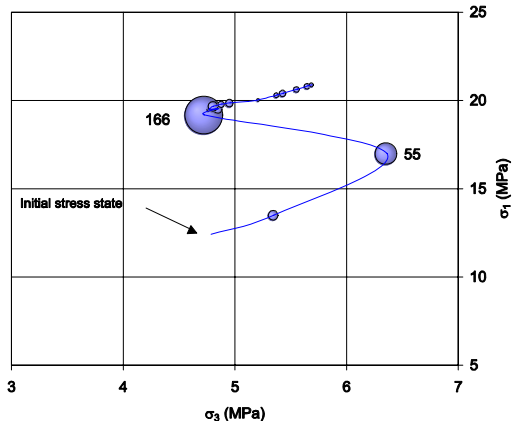


図-5 H3-Ch7 位置の応力経路と解析による亀裂発生数

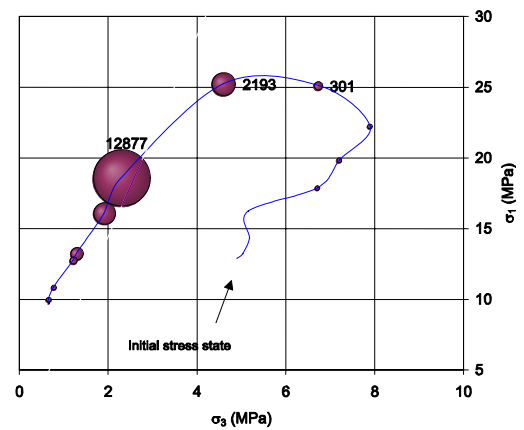


図-6 H4-Ch4 位置の応力経路と計測 AE 発生数

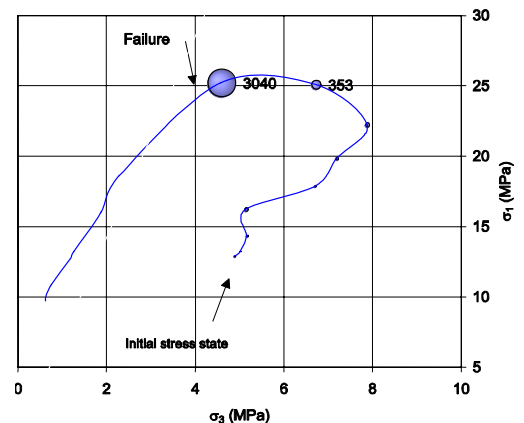


図-7 H4-Ch4 位置の応力経路と解析による亀裂発生数

4. まとめ

本検討では、弾塑性 FEM 解析で得られた空洞掘削時の応力変化を外力とした DEM 解析による要素レベルの载荷シミュレーションを実施し、亀裂発生数と AE 発生数が岩石供試体の挙動と同様に対応することがわかった。本手法の適用限界として①要素シミュレーションのため掘削時の主応力の回転を考慮できない点、②応力制御の DEM 解析であるため、破壊後の挙動を評価できない点があるが、これらは、DEM 解析と有限差分法 (FDM) 解析をカップリングさせた掘削解析により解決できることがわかっている³⁾。ここでの手法は、カップリング解析と比較して簡易に施工時の AE 挙動の評価・予測が可能であることから、迅速性が要求される施工時の安全管理に有用な手法と考えられる。

【参考文献】

- 1) Itasca Consulting Group Inc. : PFC^{2D} Particle Flow Code, Version 3.0, 2002
- 2) 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, pp81-96, 2005
- 3) 田坂嘉章, 黒瀬浩公, 森岡宏之, 南将行, 前島俊雄, Ming CAI: 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, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp335-340, 2005