

## 第Ⅲ部門

## 陽解法と陰解法を連成した岩石の水圧破砕シミュレータの開発

大阪大学大学院工学研究科	学生員	○家永 凌冨
大阪大学大学院工学研究科	正会員	緒方 奨
大阪大学大学院工学研究科	学生員	前田 悠太郎
大阪大学大学院工学研究科	正会員	乾 徹

## 1. 研究の目的

近年地熱発電を促進する新技術として地熱増産システム(EGS)の研究開発が活発に進められている。その主要技術である貯留層造成EGSでは地下岩盤に人工の貯留層を造成し、蒸気を生産する。そこで、蒸気の生産能力を定量的に予測する上で重要となるのが地熱貯留層の造成形態に対する正確な予測である。これを実現するには、水圧破砕時の亀裂の進展過程を再現可能な数値シミュレータが必須である。近年、連続体-不連続体統合解析手法(FDEM)をベースとした岩石水圧破砕解析の事例が多数報告されている(例えば, Yan and Jiao (2018)<sup>1)</sup>)しかし、これらの水圧破砕解析のベースであるFDEMは陽解法に従い定式化されており、許容時間刻みが非常に短いため、破壊の駆動力となる流体流動等を実現現象と同じ時間スケールで計算することが困難となる。そこで本研究では、陽解法のFDEMによる亀裂進展解析を、不連続亀裂ネットワーク(DFN)モデルに基づく陰解法(陽解法より許容時間刻みが大幅に長い)の流体流動解析と連成させ、より広範な時間スケールに適用可能な水圧破砕シミュレータへと拡張し、実験室規模での水圧破砕を想定した数値実験を通じてシミュレータの基本性能を確認する。

## 2. シミュレータの概要

本研究で構築するシミュレータは、流体の注入圧上昇や岩石実部への浸透を経て亀裂の発生・進展や亀裂面での流体流れが進行していく一連のプロセスを陽に亀裂面を導入し精

緻に表現する数値シミュレータである。提案シミュレータの解析フローと解析で用いるFDEM, DFNモデルの概念図を図1に示す。DFNモデルによる計算は陰解法であるため実時間に即したタイムステップで計算を行い、FDEMによる計算では実時間とは対応してない別のサブタイムステップで計算を行う。一般的に、岩石内の亀裂の発生・進展は流体流動に比べ、より突発性が高く急速に進行することが想定される。これを鑑み、本研究で行う水圧破砕解析では、注入圧上昇に伴う流体圧変動及び流体流動プロセスをDFMモデルによる実時間に即したタイムステップ計算で追跡しつつ、各注入圧段階における動的な亀裂の発生・進展プロセスをFDEMによる極短時間刻みのサブタイムステップ計算で追跡する。この様な解析スキームに基づき、実時間タイムステップごとにFDEMとDFNモデルの間で変数を受け渡すことで、実現現象と同じ時間スケールを導入した水圧破砕解析を合理的に実現可能となる。

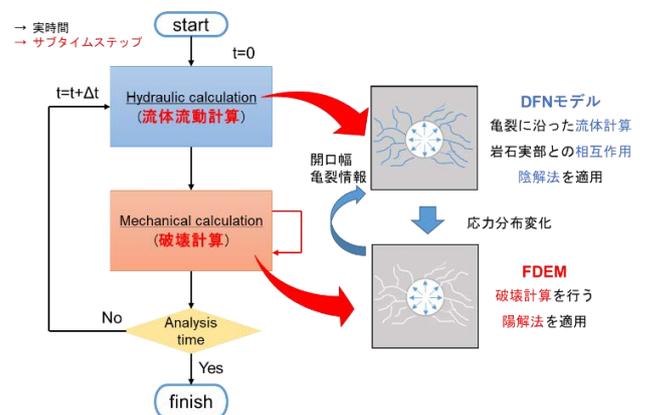


図1 解析フローと解析モデルの概念図

### 3. 水圧破砕解析概要

構築したシミュレータを用いて室内実験規模の水圧破砕を想定した解析を行う。解析モデル・境界条件・解析メッシュを図2に示す。解析に用いたパラメータは解析対象岩石として珪質泥岩を想定した上で選定した。境界部の拘束圧は $\sigma_{xx}=1.0$  [MPa],  $\sigma_{yy}=2.0$  [MPa]を与えた。また、円孔境界からの注入水圧を $p=0.4$  [MPa]+ $0.2$  [MPa/s] $\times t$  [s]とし、時間と共に注入水圧を段階的に増加させていく設定とした。

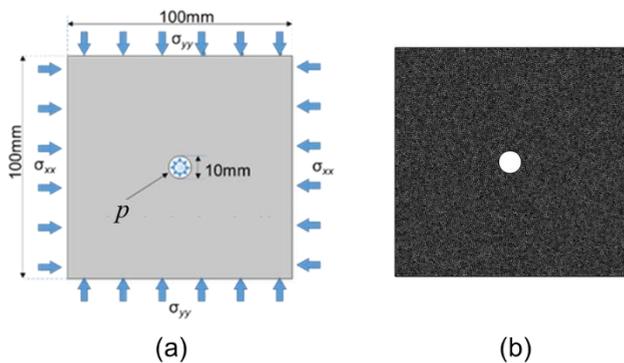


図2 解析条件

(a)解析モデル, (b)解析メッシュ

### 4. 解析結果

水圧破砕解析により得られた結果について述べる。図3に解析によって得られた水圧破砕による損傷変数  $D$  (亀裂域) の分布を示す。図3より、注入水圧の増加に伴う亀裂進展過程を、亀裂面を陽に導入しながら計算できていることが確認できる。また、FDEMをベースとした既往の水圧破砕解析<sup>1)</sup>では、1sより大幅に短い時間での水圧破砕過程しか計算できなかったのに対し、図3では10s以上の水圧破砕過程を計算できていることが分かる。次に、図4に解析終了時に発生済みの亀裂について、発生時の破壊モードを示す。図4よりほとんどの亀裂が引張破壊であり、最大主応力方向に進展していることが確認できる。これは異方拘束圧条件下では最大主応力方向に引張亀裂が進展するという従来理論<sup>2)</sup>と整合している。

### 5. まとめ

FDEM 計算での実時間の概念を取り除いた水圧破砕シミュレータを提案した。水圧破砕を想定した数値実験の結果から、提案シミュレータが亀裂面を陽に導入しつつ、既往の解析<sup>1)</sup>よりも大幅に長い時間スケールでの水圧破砕過程を計算可能であることが確認された。

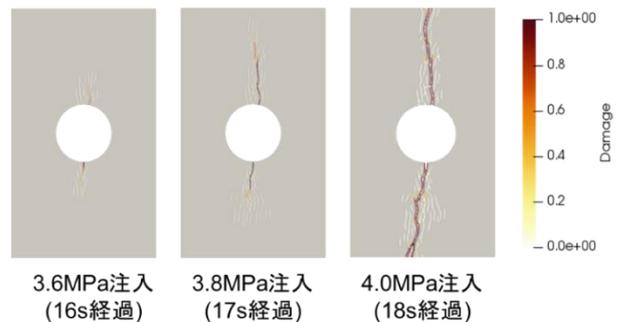


図3 水圧破砕時の損傷変数  $D$  の分布

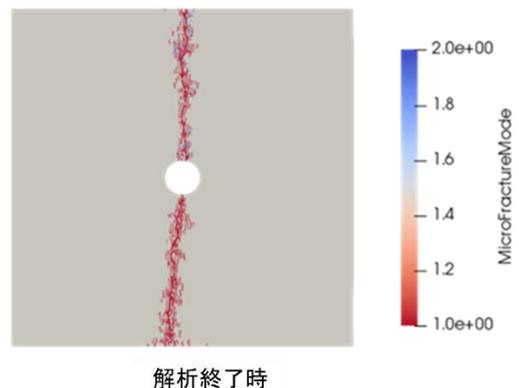


図4 破壊モード(1の値をとる赤色領域：引張破壊, 2の値をとる青色領域：せん断破壊)

### 6. 参考文献

- 1) Yan, C. Zheng. and Jiao, YY.: A 2D fully coupled hydro-mechanical finite-discrete element model with real pore seepage for simulating the deformation and fracture of porous medium driven by fluid, Computers and Structures, Vol. 196, pp.311-326, 2018.
- 2) Zhang, Y., Ma, Y., Hu, Z., Lei, H., Bai, L., Lei, Z. and Zhang, Q.: An experimental investigation into the characteristics of hydraulic fracturing and fracture permeability after hydraulic fracturing in granite, Renewable Energy, Vol. 140, pp. 615-624, 2019