第Ⅲ部門 貯留槽造成 EGS を想定した地熱流体流動解析

大阪大学工学部	学生員	○前原	崇志
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	正会員	乾	徹

1. はじめに

現在,世界各国で低炭素・脱炭素社会が求められてお り、再生可能エネルギーである地熱発電が再び注目を 集めている. 我が国の地熱資源量は世界第3位にも関 わらず、その発電割合は1%を大きく下回っている現状 である.地熱発電量を増大させるためには新規技術の 開発が不可避であり、近年、地熱増産システム(EGS: Enhanced Geothermal System)の研究開発が国内外で活 発に進められている. EGS の主要技術である貯留槽造 成 EGS では、地下 3km 以深の 200~300℃の高温岩盤に 水を圧入し、人工の地熱貯留槽となる亀裂を造成 (水 圧破砕)し、そこに流体を注入し循環させることで蒸気 を生産する.この EGS 技術を実用化する上で、蒸気生 産量の予測評価手法の確立が急務である. そのために は, 蒸気生産量を左右する岩盤への地熱貯留槽(亀裂群) 造成過程と貯留槽内の経時的な地熱流体流動を併せて 記述する数値解析の枠組みが必要であるが、これまで にほとんど構築されていない.

本研究では、水圧破砕による高温岩盤での亀裂造成 からその先の地熱流体流動までを記述対象とする数値 解析モデルを提案し、それを用いて貯留槽造成 EGS を 想定した水圧破砕解析および地熱流体解析を実施した.

2. 水圧破砕解析

本研究では、まず、有限要素法を用いて、低透水性の 結晶質岩を対象とした水圧破砕解析を行った.水圧破 砕解析は多孔質弾性体理論とダルシー則を用いた変形 ー浸透連成計算により実施した.破壊判定には等方性 損傷理論を用いた.本解析では、深度 3000m 地点にお ける、円坑井を中心とした水平方向 20m×20m の平面 を抽出した 2 次元モデルを設定し、坑井からの注水を 経時的に増加させた場合の亀裂進展を計算する(図1). 水圧破砕解析より得られた岩盤の損傷度合い(損傷変

Takashi MAEHARA, Sho OGATA, and Toru INUI maehara t@civil.eng.osaka-u.ac.jp



図2. 水圧破砕解析による損傷領域進展の様子

数 D) の分布を図 2 に示す. この損傷変数 D は 0 から 1 の値を取り, 0 が損傷無し, 1 が完全に破壊した状態 を表しており, D>0 の領域を亀裂とみなすことができ る. 図のように,注入水圧の増加と共に損傷(亀裂)が 着目した水平断面における最大主応力方向に進展して いき,最終的には坑井から解析領域の上下端に向う約 8m ずつの進展が確認された.

3. 地熱流体解析

水圧破砕後の結晶質岩は, 亀裂部, 岩石実質部という 空隙構造の異なる二種類の領域を有している.本研究 では、このような両空隙系における流体挙動を個別に 記述した上で、双方の相互作用を考慮可能な Dual porosity モデル¹⁾を水圧破砕後の地熱流体解析に適用し た.このモデルと図 2 に示す水圧破砕解析より得られ た亀裂(貯留槽)の情報を用いて、経時的な地熱流体挙 動を計算した.注入井から上下 8m の位置に、抽出井を 想定した円孔を新たに 2 個設けた.領域の初期温度を 一律 200°C,注入水の温度を 20°Cとした.また、初期水 圧は一律 24MPa とし、注入井における水の注入圧*P_iを* 30MPa,抽出井における水の抽出圧*P_eを* 20MPa と設定 した.解析期間は 3 年とした.

図3に0.1年後の亀裂内温度分布と、その時のy方向 の流速の分布を示す.低温の注入水が水圧破砕で造成 された亀裂を通じて抽出井へと流れていき、亀裂内の 温度が低下していることが分かる.また、抽出井近傍で の温度経時変化を図4に示す.本解析では、3年経過時 には40℃付近まで温度が低下する結果となった.

また,坑井の注入圧と抽出圧の違いによる温度分布 の経時変化の違いを検討した.注入圧・抽出圧のいずれ か一方を変化させた場合の抽出井近傍での温度変化を 図5,図6に示す.これより,注入圧・抽出圧を初期水 圧の24MPaに近づけるほど,同一時間での温度がより 高くなっていることが分かる.これは,流体流動の駆動 力となる,注入圧・抽出圧-初期水圧の間での圧力差が 低下したことにより,亀裂内流速及び熱伝達速度が低 下したためである.

4. まとめ

本研究では、水圧破砕解析及び、その後の地熱流体解 析を一貫して行える解析モデルの提案を行った.水圧 破砕解析では、水の圧入により最大主応力方向に亀裂 が進展する挙動が確認できた.また、地熱流体解析では、 亀裂を通じた流体流動による亀裂内の経時的な温度変 化挙動が確認できた.さらに、抽出圧・注入圧の変化が 抽出水温度に大きく影響することも明らかとなった.

今後は、実験結果との比較を通じて、水圧破砕時の破 砕圧や亀裂進展形態について解析モデルの再現性を詳 細に検証する必要がある.また、本研究で構築したモデ ルでは、流体解析において熱輸送のみを検討したが、高 温高圧環境下で活発化し地熱流動特性に無視できない 影響を与えることが予想される地化学現象等も考慮可 能なモデルへの拡張が必要だと考える.



参考文献

 Balenblatt, G. I., Zheltov, and I. P., Kochina, I. N.: Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 24, No. 5, pp. 852-864, 1960