

高温岩体発電における水圧破碎および抽熱循環の解析

Analysis of Hydraulic Fracturing and Heat Extracting Circulation in Hot Dry Rock Projects

澤田昌孝*・堀井秀之**

Masataka SAWADA and Hideyuki HORII

Feasibility of Hot Dry Rock Projects requires a significant permeability enhancement of the rock mass by stimulation and technique to grasp configuration of reservoir from the ground surface. It is difficult to get information deep underground. Then it is necessary to develop analysis of hydraulic fracturing and heat extracting circulation. In analysis of stimulation, it is assumed that the government mechanism during stimulation is sliding along the discontinuity, and equivalent continuum model including such effect is established. Then, analysis of circulation using reservoir geometry after analysis of stimulation is attempted with respect to several permeability values.

1 はじめに

高温岩体発電は、1970年代はじめに米国ロスアラモス国立研究所の研究者により考案された地熱開発の一つの方法である。この方法では、まず地下深部の高温の岩盤に坑井(注入井)を掘削して、この坑井を通して岩盤に高压の水を圧入し、岩盤内に亀裂を進展させる(水圧破碎)ことにより貯留層を形成する必要がある。さらに、別の坑井(生産井)を掘削して注入井から水を循環させることにより岩盤の熱を地表に取り出し、発電などに利用するものである。CO₂などの発生がないクリーンエネルギーであり、資源量が膨大であることから次世代のエネルギーとして期待されている。

我が国の高温岩体に対する技術開発の取り組みは比較的早く、1984年から山形県肘折地区において、新エネルギー産業技術総合開発機構(NEDO)が実施主体となり、高温岩体エネルギー開発のための実験が実施されている。また、電力中央研究所が実施主体となり、1989年より秋田県雄勝町に実験場を設け、高温岩体発電の実験を行なっている。

各国で行われている高温岩体プロジェクトの実験結果を検討すると、対象となる地下深部の岩盤には天然のジョイントネットワークと大きな偏差応力が存在し、水圧破碎中は水圧の作用によりジョイント面の有効直応力が減少し、せん断すべりが発生することが明らかになった[1]。また、初期地圧、ジョイントの走向・傾斜、平均間隔といった種々の条件に水圧破碎結果が強く依存する傾向があり、サイトの特性に応じて最適なHDRシステムの形態が異なることが報告されている[2]。

高温岩体発電を実現するためには大深度地下から得られる限られた情報から、水圧破碎による貯留層の形状・サイズ・透水性を予測する技術、水循環における抵抗・水回収率・熱抽出特性を予測し、最適な生産井の位置を特定する技術が必要である。

2 水圧破碎のモデル化

水圧破碎のモデル化をするにあたって「マイクロメカにクスに基づく等価連続体モデル(MBCモデル)[3]」を水圧の効果を含めることによって拡張した。MBCモデルの考え方は個々のジョイントの挙動を平均化することによ

* 学生員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

** 正会員 Ph.D 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

り岩盤を等価な連続体に置き換えるというものである。このモデル化の特徴は個々のジョイントの開口・せん断変形を評価した連続体モデルであること、卓越するジョイントセットの走向・傾斜・平均間隔等の情報を解析の入力データとして直接解析に反映できること、解析結果としてジョイントの開口・岩盤の透水係数の空間分布が得られることである。

岩盤中でジョイントは巨視的には完全に平面ではなく、大きな周期の起伏を有しているものと考えられる。そこで、図(1)のような鋸歯状の起伏を有した不連続面の一部がせん断すべりを起こすことによってジョイント全体が開口を引き起こすものとする。ジョイントのせん断すべりを生じる条件としては、クーロンの破壊条件を用いる。また、ジョイントでの変位量はジョイントを包含する岩盤によって定まる。ジョイントを包含する岩盤の剛性を評価するために系の剛性という概念を導入する。これにより以下のような岩盤の構成式が得られる。

$$\Delta \bar{\epsilon}_{ij} = \bar{D}_{ijkl} \Delta \bar{\sigma}_{kl} + \bar{\xi}_{ij} \Delta P, \quad (1)$$

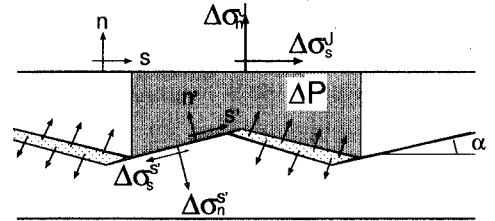


図 1: 起伏を有するジョイント

ここで、 \bar{D}_{ijkl} はジョイントを含む岩盤の巨視的接線コンプライアンスである。この岩盤の構成則をダルシー則・連続の式と連立させることにより [4]、岩盤変形・浸透流の連成解析を行う。

3 肘折水圧破碎試験の解析

前章で述べたモデルを用いて 1992 年に山形県肘折実験場で行われた大規模水圧破碎試験の 3 次元有限要素解析を行う。要素としては 4 自由度/節点トライリニア要素 (6 面体, 8 節点) を用いる。境界条件に関しては、一様な初期応力下で、外側境界で変位・水圧とも一定とする (変位は 0, 水圧は 13MPa)。計算を行う領域は $2 \times 2 \times 2 \text{ km}$ の立方体であり、 x, y, z 方向をそれぞれ 15 個に分割する (総節点数 4096, 総要素数 3375 となる)。最も小さい要素は中心要素でサイズは $20 \times 20 \times 20 \text{ m}$ である。

一般に、注入試験においては注入流量を制御し、注入水圧はその応答として計測される。本解析においても注入流量を入力データとして用いる。この解析の結果として、各タイムステップにおける水圧、貯留層の形状・サイズ、透水係数の空間分布が得られる。用いた注入流量の値は解析の結果得られた注入水圧とともに図(2)に示す。また、主な解析パラメータの値を表(1)にまとめておく。

表 1: 解析パラメータの値

| | |
|--------------------|---|
| 初期地圧 | $\sigma_H = 64.8 \text{ MPa} (N95^\circ E)$ |
| | $\sigma_h = 39.4 \text{ MPa}$ |
| | $\sigma_z = 52.7 \text{ MPa}$ |
| 岩盤の物性 | $E = 40 \text{ GPa}$ |
| | $\nu = 0.2$ |
| ジョイント情報 (2 セット) | 走向 $N70^\circ E$ |
| | 傾斜 $65^\circ N$ |
| | 走向 $N100^\circ E$ |
| | 傾斜 $45^\circ N$ |
| | size = 10m |
| | distance = 1m |
| | 摩擦角 $\phi = 35^\circ$ |

解析によって得られた貯留層の形状を図(3)に示す。この図は開口変位の発生した領域を示しており、一変の長さは 2km である (左上:上から見た平面図, 左下:南から北を見た側面図, 右上:東から西を見た側面図)。南北方向よりも東西方向および鉛直方向に貯留層が広がっている。図(4)は水圧破碎中に観測された AE ソースの分布を表している [5]。1 辺の長さは 1km であるので、解析結果の貯留層の方が 20% 程度大きいのが、形状はよく特徴を捉えていることがわかる。この時透水係数は初期値の $5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ から最大約 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ まで変化した。貯留層内の透水係数はおおむね $1 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \sim 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ に収まった。

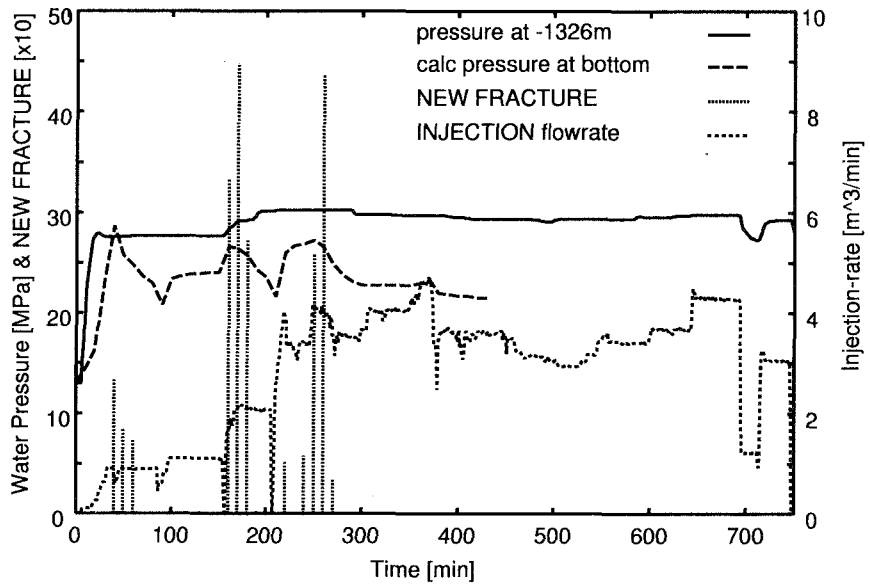


図 2: 流量と水圧の時系列データ

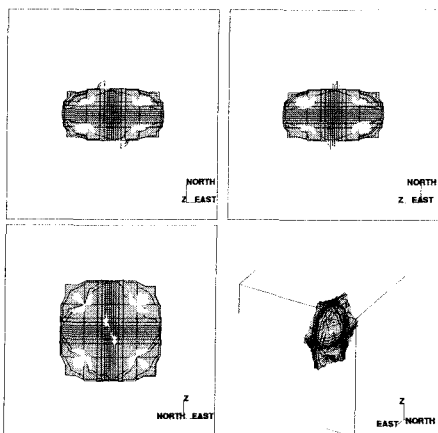


図 3: 貯留層の形状の解析結果

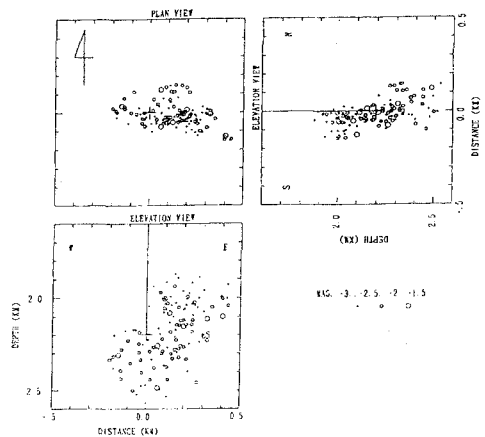


図 4: 肘折水圧破碎試験での AE ソースの分布

4 循環試験解析

高温岩体発電システムの設計の条件は熱抽出の可能性・経済性である.. これらを支配している項目としては水循環系の流れインピーダンス・水回収率・抽熱特性が挙げられる. 流れインピーダンスは注入井と生産井の圧力差を生産熱水の流量で除した値であり, $GPa\ s/m^3$ という単位で表される. この値は水循環に対する貯留層の抵抗を表しており, 小さいほど望ましい. 水回収率は注水エネルギーおよび確保水量に大きな影響を及ぼす重要項目である. 熱抽出特性については, 20年程度の期間に渡って発電を継続する必要があるため, 初期熱水温度およびその経時変化が重要となる. 以下の循環試験の解析では, 流れインピーダンス・水回収率について検討する.

解析の対象とする循環試験は, 1995年に山形県肘折実験場で行われた約1ヶ月間に渡る注水実験である. この循環試験は注入井を1本(HDR-1), 生産井を2本(HDR-2a,HDR-3)用いて行われた. HDR-1井から見てHDR-2a井は西方約70m, HDR-3井は東方約100mに生産ポイントが位置している. 注入流量を約 $2m^3/min$ で一定としたときには, HDR-2a井, HDR-3井ともに約 $0.3m^3/min$ の熱水を回収した. 坑口圧はHDR-1井では約12MPa, HDR-2a井, HDR-3井では約1MPaであった[6]. この期間の流れインピーダンスは約 $2.2GPa\ s/m^3$, 2本の実験井からの水回収率は約30%であった.

生産井の位置を検討するとき, 水圧破碎後までの情報を参考にするわけであるが, この段階では貯留層内の透水係数分布に対する十分な情報は得られていない. そこで, 前章の解析結果として得られた透水係数分布を初期値とした循環試験解析を行う. 解析法としては単純な浸透問題の有限要素解析を採用する. また, 循環試験中は注入井では注入流量を制御し, 生産井では水圧を制御している. そこで本解析では注入点にあたる要素の節点に流量を与え, 生産点にあたる要素の節点に水圧(19MPa)を境界条件として与える. 外側境界は水圧18MPaで一定とする.

前章の解析結果として得られた透水係数分布を用いて解析を行うと, 応答として得られる注入井の水圧がほとんど上昇せず流れインピーダンスの値が極端に小さくなってしまふ. 貯留層の形状・サイズについてはAEソースの分布とおおよそ一致しているので, 透水係数の値が実際の値と比較して大きすぎるのが原因と考えられる. そこで貯留層内の透水係数の値を均一にし変化させ, 他の条件を同じにして実際の試験に近い流れインピーダンスおよび水回収率が得られる貯留層内透水係数の値を調べることにする. 解析結果を表(2)に示す.

表 2: 透水係数の値による流れインピーダンスの変化

| 透水係数 (m^2) | 注入井坑口圧 (MPa) | 流量 2a(m^3/min) | 流量 3 | インピーダンス 2a | インピーダンス 3 |
|------------------------|--------------|--------------------|-------|-----------------------|-----------|
| 5.00×10^{-14} | 1.597 | 1.59 | 0.313 | 2.25×10^{-2} | 0.114 |
| 1.00×10^{-14} | 5.916 | 0.508 | 0.275 | 0.581 | 1.07 |
| 5.00×10^{-15} | 10.778 | 0.502 | 0.269 | 1.17 | 2.18 |
| 現地実験 | 12 | 0.3 | 0.3 | 2.20 | 2.20 |

貯留層内透水係数の値が小さくなると, 生産流量(水回収率)は小さくなり, 注入井水圧および流れインピーダンスは増加することがわかる. 透水係数が $5 \times 10^{-15}m^2$ の時, 現地実験とほぼ一致した値が得られた. 水圧破碎解析後得られた貯留層内の透水係数の値はほぼ $1 \times 10^{-13}m^2 \sim 1 \times 10^{-11}m^2$ の間なので, 明らかに透水係数が大きすぎることをわかる.

現在の水圧破碎モデルでは, 水圧破碎後貯留層内の水圧が減少しても亀裂が閉じたりすることがいっさいないと仮定している. 循環試験中も貯留層内の水圧は上昇するが, 一般に水圧破碎時よりも大きな水圧がかかることはない. その水圧差の分だけ亀裂の開口幅が水圧破碎中よりも小さくなり, 透水係数の値が小さくなるといったモデル化を行うことにより, 実測結果と整合する循環試験の解析が実施できるものと考えられる.

5 まとめ

本研究では不連続性岩盤に対する MBC モデルを基にして水圧破碎のモデル化を行い、それを用いて水圧破碎試験の解析を行った。このモデル化の特徴は、卓越するジョイントセットの走向・傾斜やジョイントの平均間隔等のサイトで観測される情報を直接入力データに反映することができることである。これらの入力データに対して貯留層の形状・寸法、内部の透水係数分布を求めた。水圧破碎試験の解析結果として得られた貯留層の形状・寸法は肘折水圧破碎試験時に観測された AE ソースの分布ともおおむね一致した。

またこの解析で得られる透水係数の分布を利用して循環試験の解析を行うための予備解析を行った。本研究の水圧破碎解析モデルは水圧破碎後の水圧減少にもなうジョイント開口量の減少を考慮していないため、得られる透水係数が大きすぎることがわかった。実測結果を再現するためには水圧破碎中と循環試験中の水圧差で岩盤中の亀裂が閉じるメカニズムを循環試験解析に取り入れる必要がある。水圧破碎解析の透水係数結果を直接利用した循環試験解析が可能になれば、流れインピーダンス・水損失率を求めることにより、生産井の最適位置、最適な注入流量を決定することができる。さらに熱抽出解析を行い、熱水温度の経時変化を計算することにより、発電システムの発電容量、発電可能期間の予測を行うことになる。

これら一連の総合的解析手法が構築されれば、高温岩体発電の開発計画、設計手法において重要な役割を果たすものと考えられる。

謝辞 本研究において参考にした現場データはすべて肘折高温岩体プロジェクトの主体である NEDO により提供していただいたものである。ここに同機構関係各位に厚く謝意を表する。

参考文献

- [1] 佐々木俊二・海江田秀志: AE 観測による地下亀裂進展の評価, アコースティックエミッション特別研究委員会資料 No.106-257, (社)日本非破壊検査協会, 1997.7
- [2] Jupe,A,J and Willis-Richards,J.: Review of HDR Projects, CSM Associates Limited,1992
- [3] 吉田秀典・堀井秀之.: マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模地下空洞掘削の解析, 土木学会論文集 No.535, pp.127-163
- [4] Elsworth,D.: Computational Methods in Fluid Flow, Comprehensive Rock Engineering: Principles,Practice and Projects, Chapter 6 ,Volume 2, Hudson J.A. pp.201-226
- [5] New Energy and Industrial Technology Development Organization: FY 1992 Summary of Hot Dry Rock Geothermal Power Project in Japan
- [6] 厨川道雄・佐藤嘉晃・天満則夫・山口勉: 肘折高温岩体プロジェクトの経緯, 資源と素材 Vol.112, pp.901-906, 1996