

高温岩体発電における水圧破碎の解析手法の開発

Development of Numerical Analysis of the Hot Dry Rock Reservoir Stimulation

澤田昌孝*・堀井秀之**

Masataka SAWADA and Hideyuki HORII

Feasibility of the Hot Dry Rock (HDR) geothermal energy projects requires a significant permeability enhancement of the rock mass. This is usually achieved by a high-pressure water injection and causing fracturing of existing discontinuities, often called stimulation.

It is assumed here that mechanical behavior of rock masses during the stimulation is dominated by presence of natural joints. A micromechanics-based continuum approach is employed for the numerical analysis of stimulation tests.

Comparison of the results of 3-D FEM simulations with the data measured of Hijiori site supports the fundamental assumption.

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、地下深部の高温の岩盤に坑井を掘削して、この坑井を通して岩盤に高圧の水を圧入し(水圧破碎)、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。さらに、別の坑井を掘削して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。この方法の特徴としては、

- 石油などの化石燃料を使わない。
- CO_2 などの放出物がほとんどない。
- 従来の地熱発電と違って、熱水系の存在しないところでも発電が可能であることから資源量が膨大である。

といったことが挙げられる。

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験主体となり、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っている。

地下数千メートルでの現地実験は莫大な費用がかかるため、数値解析による予測が大きな役割を果たすことになる。高温岩体発電における循環試験の数値解析はさまざまなものが報告されてきたが、水圧破碎の数値解析モデルはあまり開発されていない。理由の一つは初期地圧・地質情報から貯留層の形状を予測することが困難だからである。本研究では「マイクロメカニクスに基づく等価連続体理論をもちいた水圧破碎解析法」(Vychytil and Horii, 1996) [1] を拡張することにより3次元岩盤変形・浸透流連成解析を可能とし、1992年に肘折実験場で行われた大規模水圧破碎試験の解析を行う。

*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

2 水圧破碎のモデル化

多くの報告によると、高温岩体発電プロジェクトの実験場に選ばれた岩盤のほとんどは天然のジョイントのネットワークを持っている。しかも、水圧破碎における AE ソースの分布を調べてみると、新規の亀裂が発生したと考えた場合よりも大きな貯留層が形成されている。本研究では天然のジョイントシステムが水圧破碎中の不連続性岩盤の挙動を支配すると考える。多くの場合ジョイントの本数は膨大であり、数値解析において個々のジョイントを個別に取り扱うことは適当ではない。不連続性岩盤を等価な連続体に置き換えることが有効であると考えられる。

一般に不連続面の変形はせん断すべりと開口に分類される。高温岩体発電の貯留層に用いられる地下深部の岩盤の地圧条件では不連続面がモード I の開口を生じる水圧は極めて大きい。一方せん断すべりは圧縮応力下でも起こり、地下深部ではジョイントがせん断すべりを生ずる限界偏差応力に近い応力状態にあることが報告されている。よってジョイントのせん断すべりを水圧破碎の支配メカニズムとする。

吉田・堀井(1996) [2] は不連続性岩盤の挙動に対してマイクロメカニクスに基づく等価連続体モデル (MBC モデル) を提案した。この水圧破碎モデルは MBC モデルを水圧の効果を含めることによって拡張したものである。MBC モデルでは、ジョイントを有する岩盤の応力-ひずみ関係は、代表要素 (R.V.E) 内の応力とひずみに対して平均操作することにより得られる。一般に岩盤の力学的応答は非線型であるため、その関係を増分方程式で表すと、

$$\Delta \varepsilon_{ij} = D_{ijkl}^R \Delta \sigma_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_m \int_{\Omega^m} \Delta([u_i^{(m)}]n_j^{(m)} + \Delta[u_j^{(m)}]n_i^{(m)}) dS, \quad (1)$$

となる。ここで、 V は代表要素の体積、 D_{ijkl}^R は基質岩盤のコンプライアンステンソル、 Ω^m は代表要素 V の m 番目のジョイント面、 n_i はジョイント面での単位法線ベクトル、そして $[u_i]$ はジョイント面での変位の不連続量 (相対変位量) である。ここでジョイント面における相対変位増分 $\Delta([u_j])$ が平均応力増分 $\Delta \sigma_{ij}$ と水圧増分 ΔP の関数として与えられるならば、式 (1) より岩盤の構成式が、

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \bar{D}_{ijkl} \Delta \sigma_{kl} + \bar{\xi}_{ij} \Delta P, \quad (2)$$

と得られる。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。

ジョイント面における相対変位増分 $\Delta([u_j])$ を平均応力増分 $\Delta \sigma_{ij}$ と水圧増分 ΔP の関数として表すために、岩盤中におけるジョイントの挙動を以下のようにモデル化した。岩盤中でジョイントは局所的に見れば直線的であるが、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する。そこで図 (1) のように鋸の刃型をしたジョイントを考える。ジョイントの変形は、一方の面におけるせん断すべりにより生じ、この場合、他方の面が開口するものとする。ジョイントのせん断すべりを生ずる条件としては、クーロンの破壊条件を採用した。ジョイントの相対変位量はジョイントを包含する岩盤によって定まるため、ジョイントを包含する岩盤の剛性を評価する必要がある。そこで岩盤と等価な均質材料にある 1 つのジョイントを考え、これに系の剛性という概念を導入し、岩盤の岩盤の剛性を評価する。これより、ジョイントの相対変位増分が応力増分と水圧増分の関数として求めることができ、最終的に岩盤の巨視的コンプライアンスが得られる。

実際の注入試験ではジョイントシステム内の水圧の分布は一樣ではなく、水圧の作用による透水性の分布、フラクチャーネットワークの連結、注入水圧の時系列も変化する。一般に、注入試験においては注入流量を制御し、注入水圧は実験結果として計測される。MBC モデルによる不連続性岩盤の力学的挙動の支配方程式を Elsworth (1992) の方法 [3] に組みこむことにより岩盤の変形と浸透流の連成解析が可能になる。ただし、ここでは熱の移動を考えないことにする。

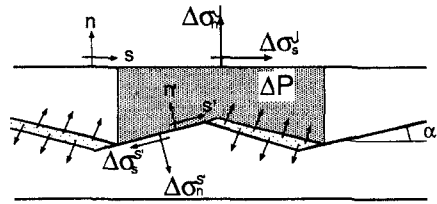


図 1: 起伏を有するジョイント

3 肘折水圧破碎試験の解析

前章までに導いた関係を有限要素解析プログラムに導入する。3次元問題を解析するために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、外側境界で変位をとめるものとする。また、外側境界での水圧は一定の値で固定する。注入流量の時系列データは中心要素の8つの節点に対して与える。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の $20 \times 20 \times 20 \text{ m}$ である。

肘折実験場で大規模水圧破碎試験が行われる前後に、地下岩盤の透水係数を計測するために小規模な注入試験が行われている。破碎前の試験の結果求められた透水係数は $2 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ であった。また、水圧破碎試験後に観測された透水係数は250倍の $5.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ となった。地表部での注入流量および水圧と地下1326m地点における水圧のデジタルデータが得られているので注入流量を解析の入力データに、水圧を解析結果との比較に用いる。初期地圧、ジョイント特性、岩盤の物性などの値は水圧破碎試験前に行われたさまざまな試験の結果得られた値を参考にして図2の値を用いることにした。入力に用いた注入流量を図6に示す。水温 100°C を仮定し、動粘性係数には $\mu = 4.76 \times 10^{-12} \text{ MPa min}$ を用いる。ジョイントネットワーク内の初期水圧は1326m地点の静水圧である13 MPaとする。

初期透水係数を $2.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ として計算を行うと破碎が全く起きない。注入水圧がせん断すべりを引き起こす水圧よりも小さい場合、透水係数は初期透水係数のまま変化せず、岩盤内の水圧の拡がり球形となる。 $1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ でも注入点のわずかに周辺のみ破碎しか起きず特徴が掴めない。そこで、ここでは $0.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ という値を用い、正規の注入流量をインプットする前に $1 \text{ m}^3/\text{min}$ の流量で20分間予備破碎を行った。この時、注入点近辺の初期透水係数は $1.0 \times 10^{-11} \sim 1.0 \times 10^{-10}$ であった。予備破碎後に実際の注入流量を入力データとして水圧破碎の解析を行った。

図3、図4はそれぞれ起伏角 $\alpha = 5^\circ, 10^\circ$ のときの貯留層の形状である(左上:上から見た図, 右上:東から見た図, 左下:南から見た図, 右下:北東上方から見た図)。

2通りの起伏角を用いて、水圧破碎のFEM解析を行った。それぞれの貯留層の形状を比較すると、平坦なジョイントよりも起伏の大きいジョイントのほうが卓越ジョイントセットの方向を反映して南北方向よりも東西方向、鉛直方向に偏って貯留層が拡がる。平坦なジョイントの場合はそれに対して貯留層の拡大は等方的であり、若干東西方向への拡がり認められるのみである。実験場では、水圧破碎時のAEソースの分布を貯留層の形状の把握に用いている。図5は肘折での水圧破碎時のAEソースの分布である。1辺の長さは1kmであるので、解析結果で表示された領域の半分である。これを見ると、南北方向よりも東西方向や深さ方向に拡がって分布している傾向がある。これは、卓越するジョイントの走向・傾斜の影響を強く受けていると考えられる。しかし、南から見たときに注入点から西上方にはほとんど分布していない。AEソースの分布と解析結果を比較してみると、貯留層のサイズに関しては、解析結果が20%程度大きめにでている。また、貯留層の形状に関しては $\alpha = 10^\circ$ の解析結果がよく特徴をとらえている。

図6、図7は注入流量、坑底部の水圧の時系列データおよび新たにせん断すべりの起こった要素数を表している。起伏角が小さい方が坑底部の水圧の値が大きくなる。また、破碎が起きる要素数は起伏角が小さいと少ない。2ケースとも水圧の解析結果は流量の変化の影響を強く受けている。注入流量の変化に対して水圧および新規破碎要素数の解析結果がどのように関係しているかを考える。注入流量が増加すると水圧の値も大きくなり、破碎が起きる。破碎が起きるとさらに流量が増加しない限り水圧の値は下がる。また、破碎が起きるほど、流量が多くなっても水圧は上りにくくなる。坑口部で観測された水圧も流量の変化を反映したグラフになっている。これに対して、地下1326m地点の水圧は最初上昇する時以外は流量の影響はほとんど受けず、ほぼ一定の値を取る。この現象の原因はまだ明らかではない。

初期地圧	$\sigma_H = 64.8 MPa (N95^\circ E)$
	$\sigma_h = 39.4 MPa$
	$\sigma_z = 52.7 MPa$
岩盤の物性	$E = 40 GPa$
	$\nu = 0.2$
	内部摩擦角 $\phi = 35^\circ$
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

図 2: 入力データの値

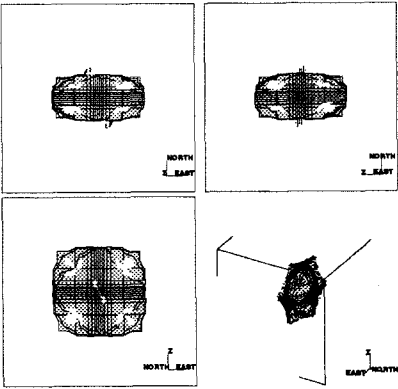


図 4: 起伏角 10° の時の貯留層の形状

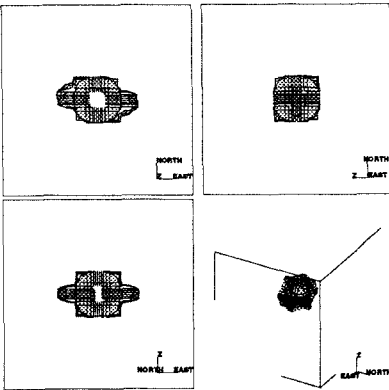


図 3: 起伏角 5° の時の貯留層の形状

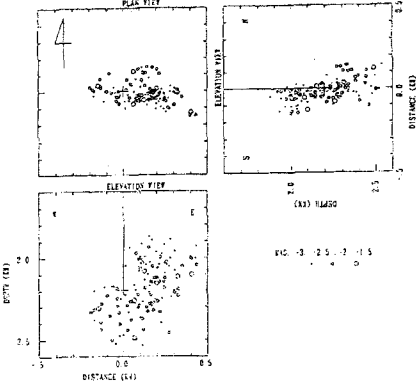


図 5: 肘折水圧破碎試験での AE ソースの分布

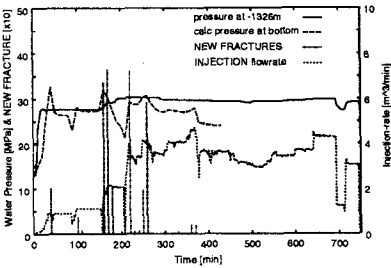


図 6: 流量と水圧の時系列データ ($\alpha = 5^\circ$)

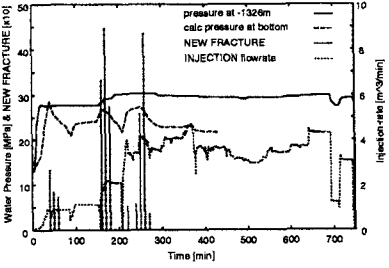


図 7: 流量と水圧の時系列データ ($\alpha = 10^\circ$)

4 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。解析に使用する入力データはボアホール TV、ボーリングコア等の現地調査で算定する。

水圧破碎試験の解析では、多くの実験プロジェクトの報告にあるように卓越するジョイントの影響を強く受けた結果が得られた。解析結果として得られた貯留層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ている。この解析で得られる透水係数と水圧の分布を利用すれば循環試験の解析が行える。しかし、起伏角の値によって解析結果の貯留層の形状が異なる。起伏角の同定方法等については、さらに検討しなければならない。現在のモデルでは熱の移動をないものと仮定している。実際には熱の移動によって、岩盤の伸縮が起こったり、水の動粘性係数が変化したりしている。初期透水係数の実測値を用いて解析を行ったときに水圧破碎が起こらなかったり、注入点における水圧の値が試験値と一致しなかった原因の一つとしてこの点が挙げられるだろう。より現実に近い解析を行うためには、現在の浸透流と岩盤の連成解析に熱移動を連成させなければならない。

本研究は水圧破碎と地下の水の流れを予測する一連の手法を提示している。解析結果として得られた透水係数の値を用いて循環試験の解析を行えば、最適な生産井の位置が特定できる。熱連成を含めれば解析としては完成する。これは高温岩体発電の実現に向けての一つのステップにすぎないが、現地実験にかかる莫大な費用を軽減し、開発リスクを小さくするという点において大き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[4] により提供していただいたものである。ここに同機関関係各位に厚く謝意を表する。

参考文献

- [1] Vychytil J. and Horii H. Constitutive Modelling and Numerical Simulation of the Hot Dry Rock Reservoir Stimulations, 東京大学修士論文
- [2] 吉田, 堀井. 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
- [3] Elsworth D. Computational Methods in Fluid Flow, Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects, Chapter 6, Volume 2, Hudson J.A. pp.201-226
- [4] New Energy and Industrial Technology Development Organization FY 1992 Summary of Hot Dry Rock Geothermal Power Project in Japan