

(15) 水圧破砕により形成されたフラクチャの形状と寸法

新エネルギー総合開発機構 正会員 ○ 厨川 道雄
ロシアラモス国立研究所 ジョージ ジボロスキー
ロシアラモス国立研究所 シュラッド ケルカー
公害資源研究所 松永 烈
工業技術院サンシャイン計画推進本部 山口 勉

1. はじめに

米国ニューメキシコ州ロシアラモス国立研究所は、深さ4,000m、温度300°Cの岩盤に人工貯留層を造ることに成功した。2本の坑井とフラクチャから成る人工貯留層を形成するには、これまでの経験から1本の坑井を掘削し、この坑井で水圧破砕を実施してフラクチャを造り、次に、このフラクチャを貫くように、2本目の坑井を掘る方式が最良であると考えられている。この方式に従って高温岩体システムを造るには、水圧破砕によって造られるフラクチャの位置や方向を予測あるいは実測することが重要である。フェントンヒルプロジェクトのように、深部かつ高温の岩盤を開発する場合、経済的および技術的制約により、フラクチャの発生位置や成長方向に関する情報は、一般に水圧による岩盤の破壊に伴って発生するAEを用いたフラクチャマッピングやボアホール温度検層によるフラクチャ発生位置の確認など間接的なものに限られる。

そこで、深部かつ高温の岩盤に水圧破砕によってフラクチャを造る際、フラクチャの挙動をできるだけ正確に予測する目的で、シミュレーションを用いてフラクチャの成長を検討した。シミュレーションにはZyvoloskiによって開発された有限要素プログラムFEHM (Finite Element Heat and Mass Transfer Code)¹⁾を用いた。このプログラムは、水の質量保存則と全体のエネルギー保存則を基本としている。応力とひずみの関係が考慮できないため、フラクチャの幅等を表現するのに、いくつかの新しい考えを導入した。

2. 水圧破砕実験EXP.2061の経過

Fig.1に示すように、フェントンヒルプロジェクトでは、2本の坑井EE-2とEE-3が掘られた。当初EE-2を水圧破砕坑井として使用する計画を立て、この坑底部やケーシングシュード直下で、何回か水圧破砕を繰返した。しかし、フラクチャは当初の予想とは異なり、EE-3の方向には進展しなかった。そこで、このとき造られた貯留層を貫通するように、EE-2の深さ2,830mから枝掘りを行った。この新しく掘削された部分をEE-3Aと呼んだ。

1985年5月に坑井EE-3Aの深さ3,519mと3,722mの間に対する水圧破砕実験により、EE-3AとEE-2とを人工貯留層によって導通することに成功した。この実験に引き続き、さらに深部にある高温の岩盤に貯留層を造ることを目的に、85年6月29日から7月2日にわたり、水圧破砕実験EXP.2061²⁾が計画された。Fig.2に示すように、坑井EE-3Aの深さ3,830mにシングルパッカーをセットし、坑底部の4,017mまでの間に水圧を加えた。総量5,230m³の水を送り、生産井であるEE-2との導通を試みた。Fig.3に実験全体にわたる流量と坑口圧力を示す。坑井への注水流量を最初0.16m³/minに設定し、その後徐々に増加して約24時間後には1.7m³/minまで上げ、実験終了時までこの流量を保った。坑口圧力も流量の増加につれて上昇し、最高47MPaまで達している。約3日間にわたる水圧破砕により、地下深部に大きなフラクチャを形成したにもかかわらず、フラクチャは主として下方に成長し、目標とするEE-2には達しなかった。

フラクチャがEE-3Aのどの位置から発生したのかを確認するため、水圧破砕の前後に坑井に沿って温度検層を実施した。その結果、水圧を加えた区間から数枚のフラクチャが発生していることが認められた。このうち、水圧を加えた区間の最深部すなわち4,017mにおける温度異常が最も大きかったので、この部分に形成されたフラクチャに大部分の水が流入したと考えた。そこで、この水圧破砕により、どのようなフラクチャ

が形成されたかをシミュレーションにより予測するとき、水圧破碎により数枚のフラクチャが形成されたが、簡単のため、最深部に存在する1枚のフラクチャで代表させても、十分な精度でモデル化できるものと思われるので、フラクチャは1枚とした。

3. EXP.2061のモデル化

Fig.2に基づいて、水圧破碎実験EXP.2061をモデル化した。モデルを坑井を中心とする軸対称問題として取り扱った。温度検層結果に基づき、深さ4,017mにフラクチャを置いた。ほとんどの境界において、水の流入や流出はないものと仮定した。シミュレーションは、主として水圧破碎によってフラクチャがどの程度の範囲に成長するかを予測することを目的とした。このシミュレーションプログラムでは、応力一ひずみの関係を考慮することができないので、何らかの形で応力の概念を導入する必要がある。そこで、フラクチャの幅 w フラクチャ内の水圧 P_w とを一定の関係式で表し、得られたフラクチャの幅と透水係数とを関係づけることにした。フラクチャの幅と水圧との関係は、次の考えに基づいて表した³⁾。

- 1) フラクチャは、水圧が低い範囲では閉じている。
 - 2) 水圧がフラクチャと直交する地圧 σ_n に近づくと、フラクチャが開き始め、水圧が σ_n と等しくなると、幅は一定値に達する。
 - 3) 水圧が σ_n を越え平衡圧力に達するまでは、フラクチャの幅は徐々に増加する。
- これらの考えを一つの式で表すことは難しいので、水圧が σ_n より小さな場合と大きな場合に分けて、2つの式で表した。

$$w = w_0 \cdot \exp(a \cdot R_p) \quad P_w < \sigma_n \quad (1)$$

$$w = w_1 - \exp(b \cdot R_p + c) \quad P_w > \sigma_n \quad (2)$$

ここで、 w_0 、 w_1 、 a 、 b 、 c 、は定数、 R_p は水圧と地圧の比($R_p = P_w / \sigma_n$)である。また、フラクチャの幅と透水係数 k との関係は、平行板内を流れる水の法則を用いて、次式で表す。

$$k = f \cdot w^2 / 12 \quad (3)$$

ただし、 f はフラクチャの流動抵抗に関する係数で、ここでは $f = 1$ とした。

4. シミュレーション結果

シミュレーションに必要なパラメータを、Table 1⁴⁾のように設定した。このようなパラメータの値を用い、(1)および(2)式における定数をいろいろ変化させた。坑口に実験で得られたのと同じ流量で注水し、シミュレーションの結果、得られる坑口圧力がFig.3に示す実験結果に最も近くなるように、定数の値を選んだ。その結果、 $w_0 = 4 \times 10^{-5}$ 、 $w_1 = 5$ 、 $a = \log(1/w_0)$ 、 $b = -0.811$ 、 $c = 1.9096$ となった。

この実験に使用したパッカーはインフレタブルタイプで、シール内部の圧力が裸坑部に加わる圧力よりも、常に高く保たれるように、直径3/4インチのチョークが取り付けられている。シミュレーションでは、このチョークによる圧力降下を考慮していない。そこで、この圧力降下を別に計算してシミュレーション結果に加え、実験値と比較した。チョークによる圧力降下は次式で与えられる。

$$\Delta P = 0.000695Q^{1.985}$$

ここで、Qはl/sの単位を持つ流量である。Fig.4の点線は、Fig.3に示す流量を与えたとき得られた坑口圧力のシミュレーション計算結果を示す。この点線と実験の際得られたポンプ圧力と比較すると、ほぼ満足できる程度に両者は一致しているといえる。そこで、このシミュレーション結果をもとに、フラクチャの成長等について検討してみることにした。

Fig.5は、シミュレーション計算結果で、経過時間をパラメータとしたフラクチャ半径とフラクチャ幅との関係を表す。これによると、実験開始後12時間以内においては、フラクチャの幅は、フラクチャの先端に近づくにつれて減少している。また、時間の経過とともに、ほぼ同じ形状を保ちながらフラクチャが拡大している。しかし、実験開始後12時間以上経過すると、フラクチャ中心からある範囲までフラクチャの幅が約2mmと一定値を保ち、この範囲を越えるとフラクチャの幅は減少する傾向を示す。フラクチャの幅が一定値を示す範囲は、経過時間とともに、大きくなる傾向にある。これに比べフラクチャ先端の経過時間に伴う伸びは、顕著ではない。以上のことから、次のことがいえる。1)水圧破砕により形成されるフラクチャは、初期段階では一定の形状を保ちながら、時間の経過とともに成長する。2)しかし、一定時間以上経過すると、フラクチャはいくぶん進展を続けるものの、その進展速度はかなり遅くなり、逆にフラクチャ全体が膨らむような傾向を示す。

また、同図の破線は、坑井をシャットインした後の、フラクチャの形状変化を示している。これによると、フラクチャ中心からフラクチャの半径の半分までの範囲では、フラクチャの幅は時間の経過とともに、減少しているが、逆にフラクチャ半径の半分より大きい範囲では、フラクチャの幅はわずかではあるが広がり、かつフラクチャ先端も進展していることがわかる。坑井をシャットインした後も、フラクチャが進展するという事実は、これまで何回か確認されている。例えば、フェントンヒルにおける水圧破砕実験でも、破壊の微候を示すAEの活動はシャットイン後も活発であるし、また日本の焼岳フィールドにおける実験では、坑井をシャットインした後に、フラクチャが水圧破砕坑近辺に掘削された坑井と導通している。

参考文献

- 1) Zyvoloski, G., Int. J. for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, pp75-86, Vol.7, 1983.
- 2) Dash, Z., Burns, K., Kelkar, S., Dressen, D., House, L., Miller, J., Zyvoloski, G. and Murphy, H., Office Memo, Los Alamos National Lab., August 1985.
- 3) Zyvoloski, G., Proceeding of 11th Workshop on Rock Mechanics, pp355-362, June 1985.
- 4) Kelkar, S., Zyvoloski, G., and Dash, Z., Proceeding of 11th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering at Stanford University, pp1-5, Jan. 1986.

Table 1. Parameters and thier values used for simulation.

Parameter		Value
Permeability	x-direction	$7 \times 10^{-16} \text{ m}^2$
	y-direction	10^{-17} m^2
	Thief zone	10^{-12} m^2
Porosity	Matrix	0.1
	Fracture	1.0
Thermal Conductivity		2.7 W/m°C
Initial Temperature (y; m)	0 ≤ y ≤ 750	12.35 - 0.0956y (°C)
	750 ≤ y	72.29 + 0.00996y + 0.0000105y ² (°C)
Rock Density		2500 kg/m ³
Rock Specific Heat		1000 J/kg °C
Initial Pressure		0 MPa

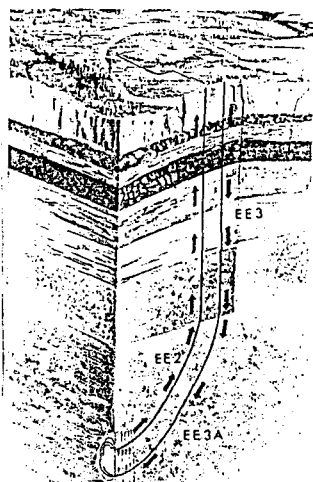


Fig.1 Hot dry concept at Los Alamos.

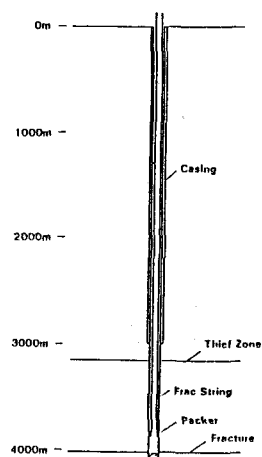


Fig.2 Location of packer in borehole EE-3A.

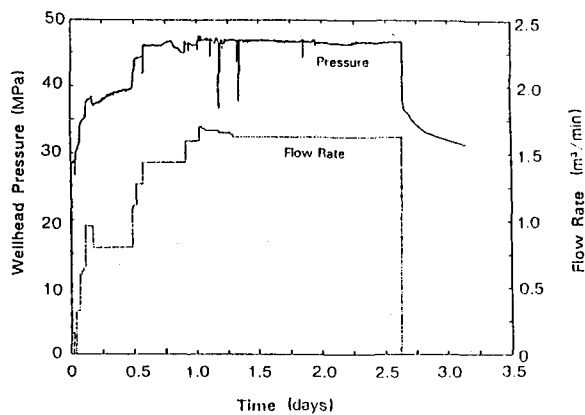


Fig.3 Wellhead pressure and flow rate during EXP.2061.

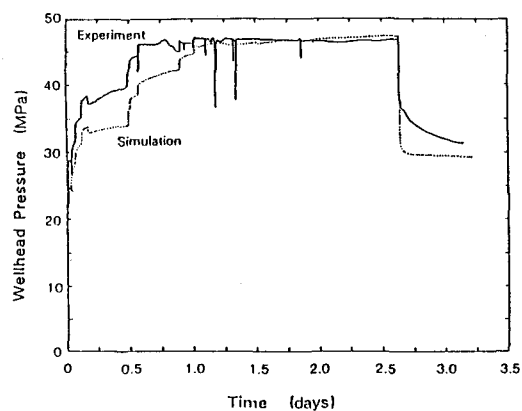


Fig.4 Comparison of simulation result with experimental result.

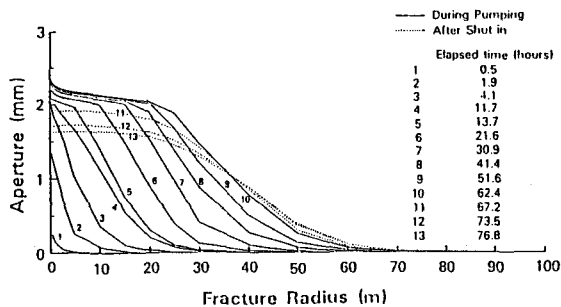


Fig.5 Fracture aperture along fracture radius.

(15) Dimension and Aperture of Hydraulically Created Fracture

Michio KURIYAGAWA¹, George ZYVOLOSKI², Sharad KELKAR³,
Isao MATSUNAGA⁴, and Tsutomu YAMAGUCHI⁵

Los Alamos National Laboratory, New Mexico, United States, with participation from Japan and West Germany, proved the technical feasibility of the concept of hot dry rock geothermal energy development. Two inclined wells (EE-2 and EE-3) drilled into hot dry rock reaches a vertical depth of about 4,000m and a rock temperature of about 300°C. Hydraulic fracturing experiment 2061 was conducted from June 29 through 2, 1985 to develop the reservoir at the bottom of the borehole. Water was injected in the interval between 3,830m and 4,017m at an average rate of 1.6m³/min with wellhead pressure of 48 MPa. As a large fracture was created by this experiment, no connection between an injection hole and a production hole was obtained in this experiment. The radius and aperture of the fracture is predicted by finite element code for heat and mass transfer called FEHM. It is disclosed that the aperture decreases rapidly towards the tip of fracture and the shape of the fracture remains similar at different time for the first 12 hours of pumping. After 12 hours, the aperture stays nearly constant from the center of the fracture to some extent and then decreases rapidly toward the tip. The length where the aperture remains constant increases with the pumping period. But, the extension rate of the fracture gets smaller.

1. Dr. New Energy Development Organization
2. Dr. Los Alamos National Laboratory
3. Los Alamos National Laboratory
4. National Research Institute for Pollution and resources
5. Dr. Sunshine Project Program Promotion Headquarters, AIST