

水圧破碎の複数き裂成長モデル

A Multiple Fracture Propagation Model for the Hydraulic Fracturing

山本晃司*・島本辰夫**・前角繁之**・瓜生暢哉***

Koji YAMAMOTO, Tatsuo SHIMAMOTO, Shigeyuki MAEZUMI, Nobuya URYU

Although real fractures in deep formation should be formed multiply with complex figures, most of the current hydraulic fracturing simulators adopt simplified fracture geometry model such as a single planar fracture from a single borehole. Such multiple and complex nature of the fractures is especially important for the heat dry rock (HDR) reservoirs, drill cutting re-injection, and some special cases of well stimulation technique.

The authors have developed a 3-D hydraulic fracturing model and reported the theoretical background and application to a real field in the previous papers^{1), 2)}. In this paper, application of the simulator is extended into multiple fractures from single or multiple boreholes. This model can determine the fracture geometry considering the interaction between fractures. Numerical modelling and some simulation results are shown in the paper.

Key Words: hydraulic fracturing, multiple fracture, displacement discontinuity method

1. はじめに

水圧破碎き裂の形成に関する古典的なモデルは、水平方向の最小主応力に垂直な平面内に一枚の平面き裂が形成されるというものであり、水圧破碎過程をシミュレートする数値モデルの大部分がこのような形状を仮定している。しかしながら、実際の石油坑井の坑井刺激の現場や、高温岩体発電の圧入井と生産井の間の流動経路を作るために行われる水圧破碎で形成されるき裂には、単一坑井から複数枚のき裂が形成されている場合が多くあると考えられている(厨川他、1989)。

また、掘削廃棄物(堀屑と掘削泥水)の地中圧入(CRI: Cuttings Re-Injection)を行う場合には、複数枚のき裂が形成されることによって、十分な廃棄物の処分体積が確保できるという考えが提示されている(Moschovidis et al., 1993)。廃棄物の地中圧入技術とは、環境への配慮の必要性から、掘削廃棄物、特にオイルベースマッドを用いた場合の掘削ザクの処分方法として、大規模(固体圧入量数千 m^3 以上、圧入期間数ヶ月以上)な水圧破碎き裂を形成し、き裂中及び周辺地層に液体と粉碎された固体粒子を貯蔵するものである。この技術の確立のためには、地表・海洋及び地下水の汚染防止の観点からき裂伸展の制御がより重要となることが予想される。

従って、坑井刺激効果の評価や、掘削廃棄物処理における環境汚染の防止のために、形成されるき裂の形状・広がり予測する技術として、複数き裂の形成が考慮できる数値解析シミュレータの開発が求められている。

筆者らは既報において、き裂の折れ曲がり考慮できる三次元水圧破碎シミュレータの理論的背景、及び計算コードに用いた数値解析技術について紹介し(山本他、1999)、フィールドデータとの比較によるモデルの妥当性に関して議論した(山本他、2000)。

本報においては、このモデルを複数き裂モデルに拡張し、その数値的基礎と解析事例を紹介する。

* 正会員 石油公団 石油開発技術センター 掘削技術研究室

** 石油公団 石油開発技術センター 油層研究室

*** 富士総合研究所 解析技術第2部 地下空間研究室

2. 複数き裂の連成解析モデル

水圧破碎の過程は、岩盤の弾性的な変形、き裂内の流体流動、及びき裂の成長の連成した複雑な過程である。水圧破碎によるき裂進展の過程を時間を追って扱うために、我々の開発した数値シミュレータには次のような数値モデルが含まれている。

- 1) き裂の開口及びせん断変形：き裂を三次元空間内に存在する曲面でモデル化し、均質・等方・線形弾性材料の応力-変位関係式を変位不連続（DD：Displacement Discontinuity）法により離散化する。き裂の変形によって生じる地層内の応力・変位場も同じ手法を用いて与えることができる。
- 2) き裂内流動：き裂内の圧入流体の流動を、流体の不連続特性をべき乗則（Power law）で表した二次元定常の平板間流れと考え、有限要素法で離散化する。地層への浸透特性は、一定内圧の平板き裂からの浸透と周辺の間隙水圧上昇の関係から、リーク・オフ流量がき裂形成よりの経過時間の平方根に反比例すると考える。
- 3) プロパント輸送：流体とプロパント（き裂の弾性支持材である固体粒子）の流れを固液二相流でモデル化し、固体粒子が流体の流量ベクトルと重力による沈降（沈降速度はストークス抵抗から計算）により運搬され则认为、粒子の連続の式を有限要素法で離散化する。
- 4) き裂成長：変位不連続法に基づくき裂先端のモードⅠ（開口モード）の応力拡大係数の計算によるき裂伸展距離の決定、及びき裂周辺の最大引張り応力方向の計算によるき裂伸展方向の決定、さらに、新たに形成されたき裂上でのリメッシュ処理を行う。

これらの過程を、流体及びプロパントの圧入スケジュールに従って、時刻歴で順次解くことになるが、各時刻ステップでは応力解析、流動解析は定常解析であり、プロパント流動は直接積分で動的解析を行っている。

DD法を用いると三次元空間内の任意点の応力状態が計算できるため、任意の形状・個数のき裂開口を同時に解くことが可能である。この手法を用いると、各節点でのき裂開口幅 ϕ は、DD法の影響関数 T を利用して、

$$p(\mathbf{x})\mathbf{n}_i(\mathbf{x}) = \sigma_{ij}(\mathbf{x})\mathbf{n}_j(\mathbf{x}) = \sum_{e=1}^E \left[T_{ijkn}^*(\mathbf{x}, \xi) \int_{\Gamma_E} \left\{ \sum_{i=1}^3 \phi_{kn}^{(i)} N_i(\xi) \right\} d\Gamma_e \right] \cdot \mathbf{n}_j(\mathbf{x}) \quad (1)$$

から決定される。ここで、 p は流体圧力、 $\mathbf{n}$ は各節点におけるき裂面の法線ベクトル、 N_i は形状関数（ここではき裂先端で、き裂先端からの距離の平方根に比例する形状関数、それ以外は一次の形状関数をセット）、 Γ はき裂面を示す。

この計算においては、各時刻においてき裂容積が圧入流量とリーク・オフ流量の差に一致する条件を満たさなければならない。第 n ステップにおけるき裂容積は、

$$W^{(n)} = \sum_e a_e^{(n)} f_{w_e}^{(n)} = \Delta t \cdot \left(- \sum_e a_e f_{L_e} + \sum_e r_e f_{q_e} \right) + W^{(n-1)} \quad (2)$$

で表される。ここで、 a_e は各要素の面積、 r は流体が圧入される境界、 f_{w_e} は各要素の開口幅、 f_{q_e} は単位時間あたりの圧入流量である。 f_{L_e} はリーク・オフ・レートを示し、 $f_L = 2c_L / \sqrt{t - t_0}$ で表される。ここで、 c_L はリーク・オフ係数、 t は経過時間、 t_0 はき裂形成時刻を示す。

単一のき裂の問題では、き裂開口幅は次式のから計算される。

$$\begin{bmatrix} T & -\mathbf{1} \\ \mathbf{a} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{p} \\ W \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで T は影響マトリックス、 $-1 = (-1, -1, \dots -1)^T$; $a = (a^{(1)}n^{(1)}_1, a^{(1)}n^{(1)}_2, a^{(1)}n^{(1)}_3, a^{(2)}n^{(2)}_1, a^{(2)}n^{(2)}_2, a^{(2)}n^{(2)}_3, \dots, a^{(n)}n^{(n)}_3)^T$ は各要素のき裂面積、 $\phi = (\phi^{(1)}_1, \phi^{(1)}_2, \phi^{(1)}_3, \phi^{(2)}_1, \phi^{(2)}_2, \phi^{(2)}_3, \dots, \phi^{(n)}_3)^T$ はき裂開口幅、 $p = p^{(n)}n^{(n)} = (p^{(1)}_1, p^{(1)}_2, p^{(1)}_3, p^{(2)}_1, p^{(2)}_2, p^{(2)}_3, \dots, p^{(n)}_3)^T$ は節点の圧力を示し、 P は積分定数である。

単一ボアホールから成長する複数き裂のき裂開口幅は

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \cdots & -1 \\ T_{21} & T_{22} & \cdots & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \\ \vdots \\ W \end{bmatrix} \quad (4)$$

で計算される。添え字はき裂の番号である。一方、二本のボアホール、あるいは独立した圧入スケジュールを与えられる二つの区間から成長する複数き裂の開口幅は

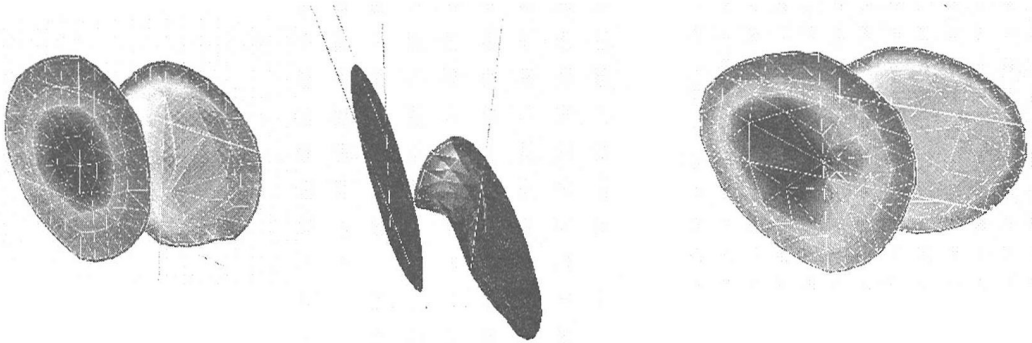
$$\begin{bmatrix} T_{B^{(1)}1B^{(1)}1} & T_{B^{(1)}1B^{(1)}2} & -1 & T_{B^{(1)}1B^{(2)}1} & T_{B^{(1)}1B^{(2)}2} & 0 \\ T_{B^{(1)}2B^{(1)}1} & \ddots & \vdots & T_{B^{(1)}2B^{(2)}1} & \ddots & \vdots \\ \mathbf{a}_{B^{(1)}1} & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ T_{B^{(2)}1B^{(1)}1} & T_{B^{(2)}1B^{(1)}2} & 0 & T_{B^{(2)}1B^{(2)}1} & T_{B^{(2)}1B^{(2)}2} & -1 \\ T_{B^{(2)}2B^{(1)}1} & \ddots & \vdots & T_{B^{(2)}2B^{(2)}1} & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \mathbf{a}_{B^{(2)}1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{B^{(1)}1} \\ \vdots \\ P_{B^{(1)}} \\ \phi_{B^{(2)}2} \\ \vdots \\ P_{B^{(2)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{B^{(1)}1} \\ \vdots \\ W_{B^{(1)}} \\ \mathbf{p}_2 \\ \vdots \\ W_{B^{(2)}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $W_{B^{(1)}}$ 、 $W_{B^{(2)}}$ はそれぞれのボアホールから圧入された量に対応するき裂容積を示す。

3. 計算例

(1) 複数ボアホールからのき裂成長

平行に掘削された二本のボアホールから、同時に、独立にき裂が成長する場合をシミュレートする。図1の二枚のき裂は最初 30 度の角度を持って形成されている。1)ボアホール間の距離が近い場合：手前のき裂は最大主応力に平行な面内に形成され、背後のき裂は初期応力により曲げられるのと同時に、前方のき裂に近い方の面が前方のき裂開口で生じた圧縮応力によってき裂面にほぼ直角な角度に曲げられて、最終的には前方のき裂と交差する。2)ボアホール間の距離がより離れている場合：き裂の急激な折れ曲がりには生じないが、他方のき裂開口により生じる圧縮応力により非対称のき裂が形成される。



(1)ボアホールが近接している場合

(2)ボアホールが離れている場合

図1 二枚のき裂の相互干渉

(2) 単一の区間からの複数き裂成長

一つのボアホールの同一区間から複数のき裂が成長する場合の計算結果を図2に示す。ここでは75°の角度で形成された二つのき裂（半径15mの円形と、長径15m短径9mの楕円形）のき裂を起点にそれぞれのき裂が成長する状況をシミュレートしている。ここでは、小さい方のき裂が先に成長した大きいき裂により生じた応力の影響を受けて水平方向への成長を妨げられ、垂直方向に進展した様子を示している。三つの図は、異なった応力条件における、同じ圧入レートで同じ圧入時間におけるき裂の形状を示している。なお、ここではき裂の折れ曲がりの計算は行っていない。

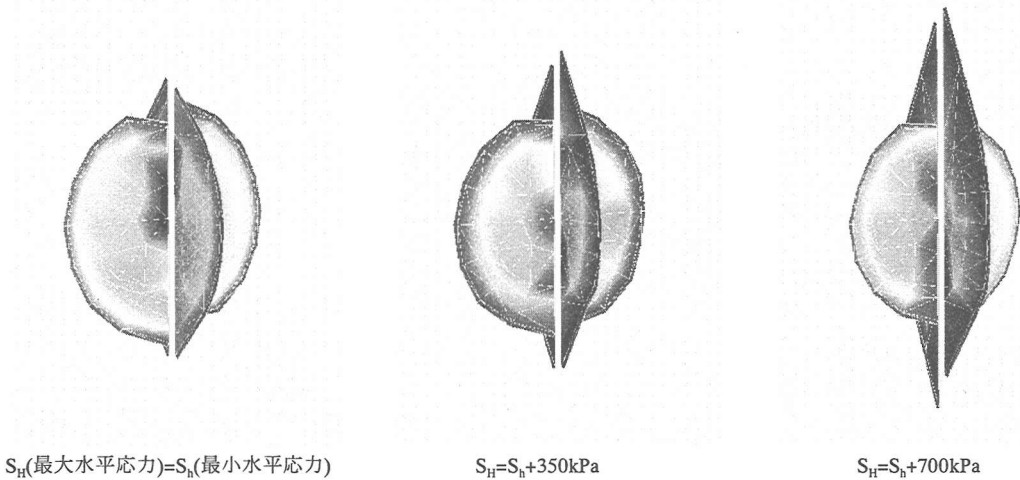


図2 単一区間から成長する複数のき裂

(3) 単一ボアホールの異なる区間から発生するき裂

等方的な応力場において、単一の坑井の異なる区間からの圧入で形成されるき裂の状況を図3に示す。ここでは二つの初期き裂は30°傾いて形成されている。き裂が一つしかない場合は円形のき裂が形成されるが、この場合は二つのき裂の相互作用により双方のき裂がお互いから離れるように変形していることがわかる。そのため、このような場合には期待したように貯留層の中に広くき裂が進展しなくなるおそれがあることがわかる。

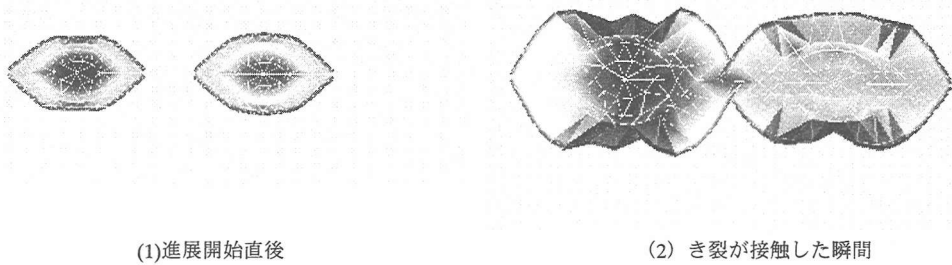


図3 水平坑井の異なる区間からのき裂成長

4. まとめとモデルの問題点

ここで提示されたモデルにより、複数き裂間の応力相互作用を考慮したき裂進展予測を可能とすることができた。このようなモデルは、掘削廃棄物の地中圧入のようなマクロな複数き裂の形成と、坑壁周辺でのき裂のトーチョシティーのようなローカルな現象の双方に適用可能であると考えられる。

しかしながら、複数き裂の問題は、既報で論じた単一き裂のモデルの問題点に加えて、今後の検討を要する以下のような項目があると考えられる。

(1)き裂のせん断変位とダイレーションによる開口

ここではモードⅠ（開口モード）の応力集中によりき裂が成長すると考えているが、き裂にせん断変位が生じる状況下ではモードⅡ及びモードⅢのせん断変位がき裂の形成に大きな役割を果たすと考えられる。

複数き裂の相互作用を考慮すると、他のき裂によって生じたせん断及び引張り応力によるき裂の折れ曲がりやせん断変位により、ダイレーションによる開口や、モードⅡ及びモードⅢの応力集中によるき裂進展が単一のき裂より重要となると考えられる。

(2)リーク・オフ・モデルの問題点

現在採用されているリーク・オフのモデルは、内圧一定の無限平板き裂からの一次元的な浸透と、それによる周囲の間隙水圧上昇によるリーク・オフ量の減少を考えている。しかしながら、複数き裂の場合には、それぞれのき裂からのリーク・オフに伴う間隙水圧上昇が他のき裂からのリーク・オフにも影響を与えられ、したがって、複数の複雑な形状のき裂を取り扱うためには、き裂周囲の間隙水圧変化を計算する浸透流モデルとの連成を検討する必要がある。

今後、以上のような点を改良しつつ、実験及び実フィールドデータとの比較によるモデルの妥当性の検証や、坑井刺激やカッティングス・リインジェクションの現場への適用を実施していく予定である。

5. 参考文献

- 1) 山本晃司、島本辰夫、市川真、伊東淳：三次元水圧破碎シミュレータの開発、第29回岩盤力学に関するシンポジウム、1999
- 2) 山本晃司、Marte Gutierrez、島本辰夫、前角繁之：北海油田の計測データに基づく水圧破碎モデルの検証、第30回岩盤力学に関するシンポジウム、2000
- 3) K. Yamamoto, T. Shimamoto, S. Maezumi, "Development of a True 3D Hydraulic Fracturing Simulator," SPE 54265, Proc. Asia Pacific Gas and Oil Conference and Exhibition, 1999
- 4) Z. A. Moschovidis, D. C. Gardner, G. V. Sund, and R. W. Veatch Jr., "Disposal of Oily Cuttings by Downhole Periodic Fracturing Injections, Valhall, North Sea: Case Study and Modeling Concepts," SPE Drilling & Completion, December 1994
- 5) 厨川道雄、ジョージ ジボロスキー、シュラッド ケルカー、松永烈、山口勉：水圧破碎による複数のフラクチャの成長－高温岩体の水圧破碎によるフクラチャ成長のシミュレーション(第2報)、資源素材学会誌 Vol. 105, No.3 (1989)
- 6) C. H. Yew: Lecture Notes on Hydraulic Fracturings, 1992