

亀裂性岩盤を対象とした水圧破碎法における 破碎流体の及ぼす影響

長曾 真弥^{1*}・三ヶ田 均¹・武川 順一¹・後藤 忠徳¹

¹京都大学大学院 工学研究科社会基盤専攻 資源工学講座応用地球物理学分野
(〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂C1-1-119)

*E-mail: masaya-nagaso@tansa.kumst.kyoto-u.ac.jp

水圧破碎による亀裂は対象岩盤に作用する応力状態だけでなく、既存亀裂の影響や破碎流体の粘性も亀裂進展に大きく影響することが分かっており、この影響を明らかにすることは水圧破碎における亀裂進展予測の正確さを向上させると考えられる。本研究では二次元個別要素法を用いて数値シミュレーションを行い、既存亀裂の走向と破碎流体の粘性が亀裂の進展に与える影響を調べた。シミュレーションの結果から水圧破碎による亀裂は既存亀裂に交差する角度が小さいほど大きな影響を受けることが分かった。また、流体が低粘性のときは破碎による亀裂が既存亀裂に捉われてそれ以上進展しないようなケースでも、高粘性流体を用いることで捉われずに進展させることができることが示された。

Key Words : *hydraulic fracturing, natural fracture, viscosity, distinct element method*

1. 緒言

水圧破碎法は非在来型資源であるシェールオイルの開発や高温岩体発電において、対象地盤内の流体の流動性を向上させるために用いられる。どちらの適用例においても水圧破碎による亀裂の進展を正確に予測することで、開発の効率を大きく向上させることができる。水圧破碎によって生じる亀裂は理論解により坑井から最大主応力方向に進展する¹⁾。しかし、山形県の雄勝で行われた高温岩体発電のフィールド実験では、水圧破碎亀裂はもともと岩盤内に存在する既存亀裂の影響を大きく受け、亀裂が必ずしも最大主応力方向に進展しなかったことが報告されている²⁾。このような既存亀裂が水圧破碎亀裂の進展に与える影響は、実験的、理論的、数値的なアプローチにより数多く研究されている^{3),4),5),6)}。Zhou et al.³⁾による室内実験では、既存亀裂の走向、透水性の違いによる水圧破碎亀裂の進展挙動の変化を調べた。さらにこの実験結果を用い、Renshaw et al.⁴⁾は、水圧破碎による亀裂が既存亀裂を貫通するかしないかについて、理論的な規準を発展させた新たな規準を示し、その有効性を検証した。Zhao et al.⁵⁾はZhou et al.³⁾の室内実験に対し、数値シミュレーションを行い、数値シミュレーションの有効性を示すとともに、既存亀裂が水圧破碎亀裂に与える影響のメカニズムを調べた。一方、水圧破

碎時に圧入する流体の粘性も亀裂進展に影響を与える要因の一つである。雄勝高温岩体発電実験では生産井から高粘性流体を用いて迎え破碎を行い、熱水の還元率を向上させている。これは、水圧破碎に高粘性流体を用いることで亀裂の開口幅が大きくなり、生産井付近の地盤の流体流動性が高まったためであると結論付けられた⁶⁾。Shimizu et al.⁷⁾は水圧破碎法において岩の不均質性と破碎流体の粘性が亀裂進展に与える影響を数値シミュレーションで調べた。高粘性流体を用いた場合、低粘性流体を用いた場合よりも多くのせん断破壊によるAEが確認され、破碎流体の粘性が水圧破碎による亀裂発生メカニズムに影響を与えていることが考えられる。既存亀裂の存在と破碎流体の粘性は水圧破碎により発生する亀裂の進展に影響を与えるため、その影響を個々に調べた研究は多い。しかし、既存亀裂と破碎流体の粘性の両方を考慮に入れ、亀裂進展の影響について考察した研究はない。この既存亀裂と破碎流体の粘性が水圧破碎に与える影響を明らかにすることは、亀裂性岩盤における開発で、破碎に用いる流体の粘性を適切に選ぶことができるという点で、開発の効率向上に貢献すると考えられる。本研究では、二次元個別要素法を用いて数値シミュレーションを行い、亀裂性岩盤における水圧破碎に破碎流体の粘性が与える影響を調べた。シミュレーションでは高粘性流体と低粘性流体を用いて

水圧破碎を行い、亀裂をある走向を持った既存亀裂と交差させ、微小亀裂の発生点を調べることで、その影響を調べた。

2. 手法

(1) 個別要素法

水圧破碎法の数値シミュレーションには二次元個別要素法を用いた。本原稿では短い説明にとどめることとし、詳細は参考文献を参照されたい⁹⁾。

粒子に作用する力は粒子同士の重複から生じる接触力と粒子同士を結ぶ物質（以下bondと呼称する）から生じる力から成る。二つの粒子が重複すると、重複の中心に接触点が設定され、法線方向の力 f_n 、接線方向の力 f_s 、モーメント M が接触点に作用する。これらの力の増分は以下のように書ける。

$$f_n = k_n(dn_j - dn_i) \quad (1)$$

$$f_s = k_s[ds_j - ds_i - (r_i d\theta_i - r_j d\theta_j)] \quad (2)$$

$$M = r_i f_s \quad (3)$$

ここで、 k_n と k_s は法線方向と接線方向のばねの剛性度、 dn 、 ds 、 $d\theta$ は法線方向、接線方向、回転方向の変位増分、 r は粒子の半径であり、 i 、 j は粒子番号である。粒子同士の重複による力は粒子が重複しているときのみ生じており、粒子が離れている場合は生じない。また、bondによって生じる法線方向の力 $\bar{f}_n$ 、接線方向の力 $\bar{f}_s$ 、モーメント $\bar{M}$ は以下のように書ける。

$$\bar{f}_n = \bar{k}_n(dn_j - dn_i) \quad (4)$$

$$\bar{f}_s = \bar{k}_s[ds_j - ds_i - (r_i d\theta_i - r_j d\theta_j)] \quad (5)$$

$$\bar{M} = \bar{k}_\theta(d\theta_j - d\theta_i) \quad (6)$$

ここで、 $\bar{k}_n$ 、 $\bar{k}_s$ 、 $\bar{k}_\theta$ は法線方向、接線方向、回転方向のばねの剛性度である。これらの剛性度は梁理論から以下のように書ける。

$$\bar{k}_n = \frac{ED}{L} \quad (7)$$

$$\bar{k}_s = \alpha \bar{k}_n \quad (8)$$

$$\bar{k}_\theta = \frac{EI}{L} \quad (9)$$

ここで、 L 、 D 、 E 、 α 、 I はbondの長さ、幅、ヤング率、剛性率、断面二次モーメントである。bondによる力は接触力と異なり、粒子が離れているときには引力として作用し、粒子を結び付ける働きをもつ。bondには垂直応力とせん断応力が作用しており、以下のように表すことができる⁹⁾。

$$\sigma = \frac{\bar{f}_n}{D} \quad (10)$$

$$\tau = \frac{\bar{f}_s}{D} \quad (11)$$

bondは垂直応力 σ がせん断応力 τ が一定値を越えたとき破壊する。すなわち、垂直応力 σ がbondの引張強さ σ_c を超えたとき、あるいはせん断応力 τ の絶対値がbondのせん断強さ τ_c を超えたとき、bondが破壊するとした。bondの破壊規準は以下の式で表すことができる。

$$\sigma \leq -\sigma_c \quad (12)$$

$$|\tau| \geq \tau_c \quad (13)$$

bondが破壊すると、bondによる力は作用しなくなり、bondによって結び付けられていた2粒子間に微小亀裂が生じる。

粒子の微小振動を抑えるため、粒子間にダンブを設置した。ダンブにより粒子に作用する力は2粒子の相対速度に比例し、以下のように書ける。

$$f_{nd} = C_n(dn_j - dn_i)/dt \quad (14)$$

$$f_{sd} = C_s[ds_j - ds_i - \frac{L}{2}(d\theta_i - d\theta_j)]/dt \quad (15)$$

ここで、 C_n 、 C_s は法線方向と接線方向の粘性係数であり、 dt は1ステップの時間である。また、 C_n 、 C_s は粒子が減衰振動するように設定され、以下のように表すことができる。

$$C_n = 2\sqrt{m_{ij}k_n} \quad (16)$$

$$C_s = C_n\sqrt{k_s/k_n} \quad (17)$$

m_{ij} は2粒子の質量から以下のように書ける。

$$m_{ij} = \frac{2m_i m_j}{m_i + m_j} \quad (18)$$

(2) 流体アルゴリズム

水圧破碎による岩盤内の流体の流れを表現するために流体アルゴリズムを個別要素法に組み込んだ¹⁰⁾。流体アルゴリズムでは孔隙を粒子の中心を結んでできる閉じた領域の中心に設定し、孔隙を流路で結ぶことで流体ネットワークを構築する。各孔隙には流体が蓄積され、圧力が生じており、この圧力を時間ステップごとに更新していくことで流体の流れを表現する。流路を流れる流体の流れは二次元シミュレーションであることから、平板流を仮定している。したがって、流路を流れる流体の流量 Q はハーゲン・ポアズユ方程式から以下のように書くことができる。

$$Q = \frac{w^3 \Delta P}{12\mu L_p} \quad (19)$$

ここで w は流路幅、 L_p は流路長さ、 μ は流体の粘性度、 ΔP は流路が結ぶ2孔隙の圧力差である。 w は粒子間距離で表すため、粒子が接触している場合、 $Q = 0$ となり流体が流れない。本モデルでは流体のネットワークを構築するために粒子の大半を接触させているため、モデル内の流体の浸透を表現することができない。したがって、粒子が接触しているとき、 w を以下のように定義することで流体の浸透を表現できるようにしている。

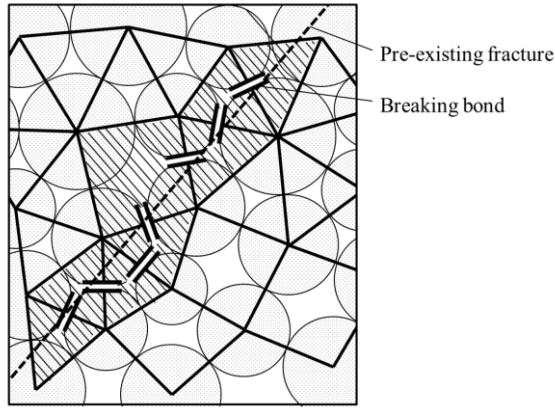


図-1 既存亀裂の導入

$$w = \frac{w_0 F_0}{F + F_0} \quad (20)$$

ここで、 w_0 は初期流路幅、 F は接触点に作用している圧縮力、 F_0 は w が初期流路幅の半分の値のときに作用する圧縮力である。孔隙内の圧力の増分は近隣の孔隙から流れ込む流体の体積と孔隙の体積変化から以下のように書くことができる。

$$\Delta P = \frac{K_f}{V_r} \left(\sum Q dt - dV_r \right) \quad (21)$$

ここで K_f は流体の体積弾性率、 V_r は孔隙の体積、 $\sum Q$ は流れ込んでくる流体の流量の総和である。粒子は流体からも力を受けており、孔隙内流体の圧力による力と流路に流体が流れることにより生じるせん断力である。粒子表面に作用している流体圧力によって生じる力 f_p は

$$f_p = \int_{-\beta}^{\beta} P \cos \theta r d\theta \quad (22)$$

ここで β は領域の頂点の内、粒子の中心を頂点とする角の半分の値である。流路壁に生じる流体のせん断力による力 f_t はハーゲン・ポアズイユ方程式を平板流に適用することにより以下のように表すことができる。

$$f_c = \frac{w}{2} \Delta P \quad (23)$$

この流体アルゴリズムでは孔隙には常に圧力が生じている状態である。すなわち、モデルは常に飽和していることになり、不飽和な部分への流体の浸透が表現できない。したがって、各孔隙に以下で示すことができる飽和度を導入した⁷⁾。

$$S_t = \frac{V_f}{V_d \phi} \quad (24)$$

ここで、 V_f は孔隙内の流体の体積、 V_d は孔隙を含む領域の体積、 ϕ は孔隙率である。 $S_t > 1$ となつてはじめて孔隙内に圧力が生じ、 $S_t < 1$ では孔隙内の圧力は大気圧と等しくなる（本研究では0MPa）。

(3) 既存亀裂の導入

個別要素法への不連続面の導入には、不連続面を強度の低い粒子の集合体とみなす方法が取られてきた¹¹⁾。この方法では個別要素の粒径を既存亀裂の幅よりも小さくしなければならないため、数値計算の安定性を保つために1ステップの時間間隔 dt を小さく取らなければならない。したがって、本研究では既存亀裂を図-1で示されるような直線で表現した。既存亀裂は背景の岩質と比べ、強度が低く、浸透率が高いという性質を持つ。この性質を表現するため、直線と2粒子の中心を結ぶ線分が交差した場合、その2粒子を結ぶbondの引張強さとせん断強さを小さくし、初期流路幅を大きくした。また、直線に交差するbondの物性を変化させるだけでは亀裂表面が過度に粗くなり、亀裂面の摩擦が大きくなりすぎてしまう。亀裂面の摩擦を小さくするため、既存亀裂にsmooth-jointモデルを適用した¹²⁾。smooth-jointモデルは既存亀裂を仮定した直線で隔てられて接触している粒子接触点に適用され、これらの粒子は既存亀裂の走向方向には重複を許され、自由に動くことができる。すなわち、粒子は既存亀裂の走向方向に動くとき、接触粒子を回り込むように動くのではなく、接触粒子をすり抜け、直線的に動くことができる。したがって、smooth-jointモデルが適用された既存亀裂は摩擦が過度に大きくなることなく、せん断滑りを起こすことができるようになる。

3. シミュレーションモデル

水圧破碎法において生じる亀裂が既存亀裂と交わるときに、破碎流体の粘性がどのように影響するかを調べるため、図-2に示すようなモデルを用意した。モデルは坑井付近を水平面で切った断面であり、これに二次元個別要素法シミュレーションを適用した。モデルは縦500mm、横500mmであり、中心に直径50mmの坑井を配置した。モデルの物性を示すパラメータである E 、 α 、 σ_c 、 τ_c 、 w_0 はキャリブレーションにより求めた。キャリブレーションでは予め軸圧縮試験、圧裂試験、透水試験のシミュレーションを行うことで、花崗岩の物性を示すようにこれらのパラメータを設定した⁷⁾。均質媒体においては水圧破碎により生じる亀裂は坑井から最大主応力方向に進展するという特徴から、水圧破碎亀裂が x 軸方向に伸びるよう、 x 軸方向に10MPa、 y 軸方向に5MPaの応力を作用させた。そのため、左壁と下壁は固定されているが、右壁と上壁は動けるようになっている。既存亀裂は坑井から右方向に距離75mm離れたところに長さ125mmで横軸と角度 θ を

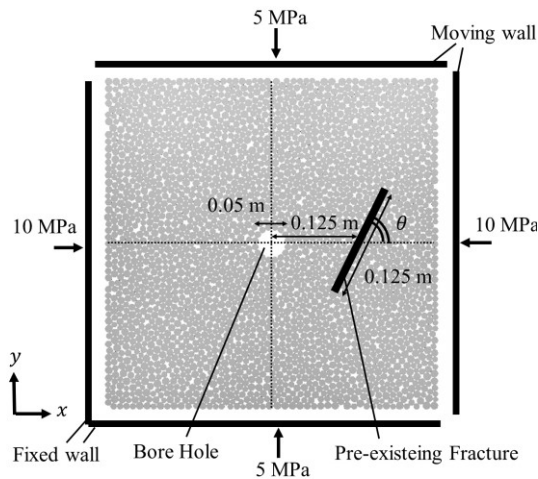


図-2 シミュレーションモデル

とるように配置した。既存亀裂における接触点のbondの強さを半分に、初期流路幅を3倍にすることで既存亀裂を表現した。水圧破碎はモデル中心の坑井に一定の流量 Q で流体を注入することで行った。本研究では横軸と既存亀裂の走向がなす角 θ が $\theta = 30^\circ$, 45° , 90° の場合において、高粘性流体 ($\mu = 100 \text{ Pa sec}$) と低粘性流体 ($\mu = 1 \text{ mPa sec}$) を用いた計6モデルで水圧破碎シミュレーションを行い、水圧破碎亀裂と既存亀裂の相互作用に破碎流体が与える影響について調べた。それぞれのシミュレーションパターンを亀裂の走向-流体の粘性となるように、30-Low, 45-Low, 90-Low, 30-High, 45-High, 90-Highと呼ぶ。

4. シミュレーション結果

数値シミュレーションの結果を図-3に示す。図-3において青い領域は圧入流体で飽和した領域であり、水色の領域は飽和度が0.5以上の不飽和領域である。また、赤、黄、黒の線は微小亀裂を示しており、それぞれ幅が0.05mm以上の微小亀裂、幅が0.01mm以上0.05mm以下の微小亀裂、圧縮力が作用している微小亀裂である。すべてのシミュレーションにおいて流体の注入から10秒まで計算したが、30-Lowは途中で計算が不安定になったため8秒までの結果を示している。低粘性流体を用いた水圧破碎では高粘性流体を用いた水圧破碎と比べると坑井や水圧破碎亀裂周りへの浸透がみられ、微小亀裂の数は少なかった。30-Lowでは水圧破碎亀裂は既存亀裂を開きながら進展し、既存亀裂との交差点から少しずれた位置から再び進展を始めた。45-Lowでは水圧破碎亀裂は既存亀裂を開きながら進展したが、既存亀裂

を越えて流体が進むことはなかった。既存亀裂を越えた位置に微小亀裂がみられるが、いずれも水圧破碎亀裂との連続性はみられない。90-Lowでは水圧破碎亀裂は既存亀裂を開くことなく、越えて進むこともなかった。45-Lowの結果と比べると既存亀裂を越えた位置に生じた微小亀裂は少ない。高粘性流体を用いた水圧破碎では水圧破碎亀裂以外への浸透はほとんどみられず、多数の微小亀裂が発生した。30-Highでは水圧破碎亀裂は既存亀裂を開き、既存亀裂の端点から再び進展している。45-Highでは水圧破碎亀裂は既存亀裂の一部を開き、既存亀裂との交差点から少しずれた位置から再び進展している。90-Highでは既存亀裂を開くことなく直行している。

5. 考察

(1) 亀裂進展方向

本節では既存亀裂が水圧破碎亀裂の進展方向に与える影響について考察する。90-Highでは水圧破碎亀裂が既存亀裂を開かず直進していることから、既存亀裂からの影響は極めて小さいといえる。また、30-Highでは水圧破碎亀裂は既存亀裂を開きながら進展し、既存亀裂端点から再び進展を開始しているという結果と、45-Highの水圧破碎亀裂が既存亀裂を開きながら進展しながらも端点まで達せずに途中で主応力方向を向いているという結果から、既存亀裂との交差角が小さくなるほど水圧破碎亀裂は既存亀裂からの影響を受けるとことがいえる。既存亀裂と最大主応力方向がなす角が小さいときほど既存亀裂に作用する圧縮応力が小さく¹³⁾、既存亀裂が開きやすい。したがって、交差角が小さいときは水圧破碎亀裂は既存亀裂を開きながら進展し、進展方向が既存亀裂に影響を受けたと考えられる。また、低粘性流体を用いた水圧破碎においても30-Low, 45-Lowで既存亀裂の開口がみられ、既存亀裂の影響を受けている。

(2) 破碎流体の粘性

低粘性流体の水圧破碎においては流体が水圧破碎亀裂から岩質に浸み込み、亀裂内部や坑井内部に水圧が蓄積されにくいと考えられる。そのため、岩体に大きな応力がかかることなく亀裂の進展は静かに生じる。また、低粘性流体を用いた水圧破碎の場合、生じる亀裂幅は小さい。したがって、流体は水圧破碎によって生じた亀裂よりも既存亀裂の方に優先的に流れ込む。これらの要因によって亀裂内に圧力が蓄積されにくく、既存亀裂を越えた位置に新しい亀裂を生じさせることができなかったため、低粘性流体を用いた水圧破碎では

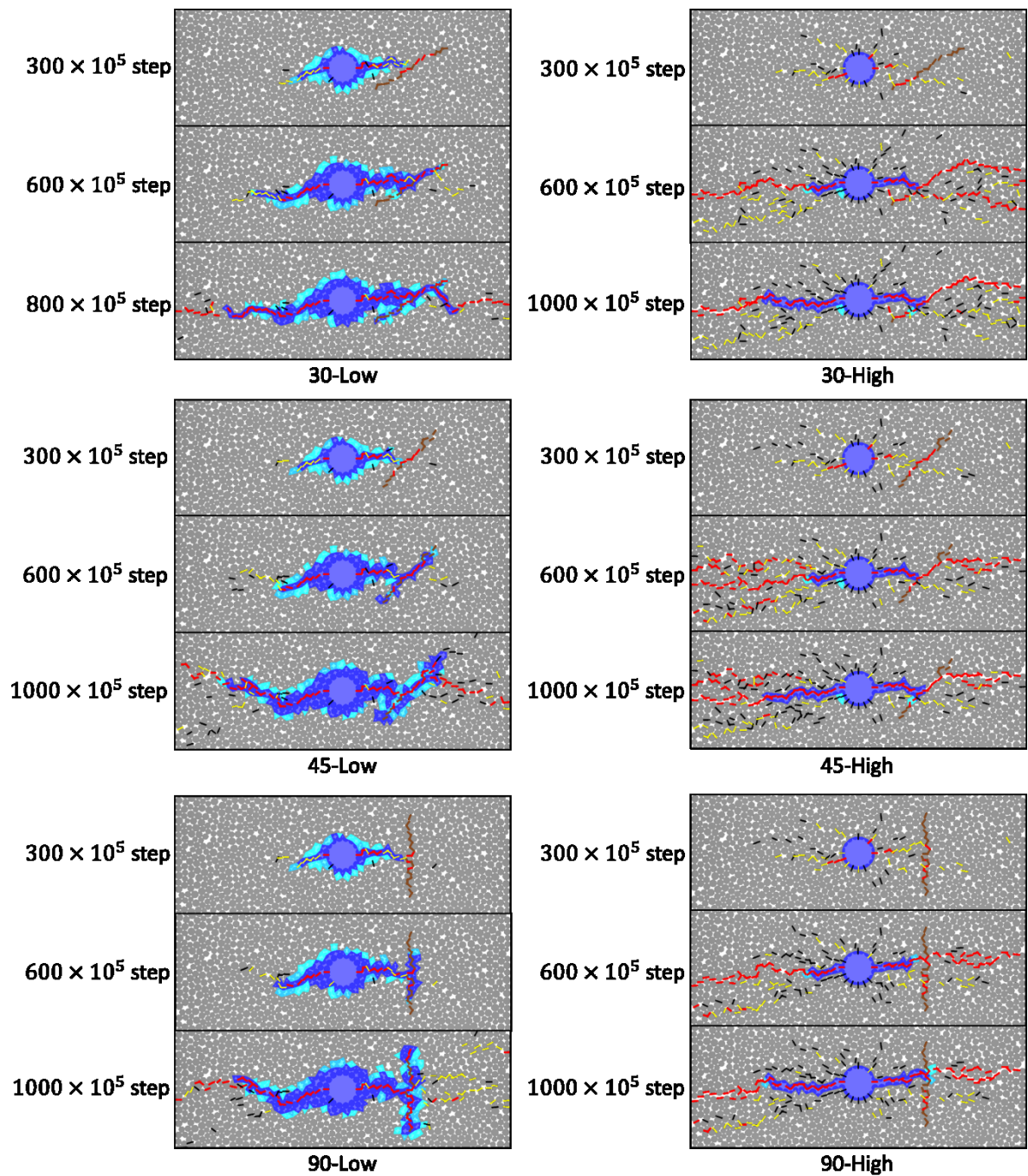


図-3 シミュレーション結果

既存亀裂が流体で満たされるまで、水圧破碎亀裂が既存亀裂を越えて進展することがなかったと考えられる。一方、高粘性流体を用いた水圧破碎では、流体が小さな隙間に侵入することができず、孔隙や坑井内に圧力が蓄積されやすい。したがって、岩体に大きな応力が作用する。また、高粘性流体を用いた水圧破碎では亀裂の幅が大きくなる。これにより、水圧破碎によって生じた亀裂の幅が既存亀裂の幅よりも大きくなることで、流体が既存亀裂に流れだしにくく、亀裂が既存亀裂を越えて進展しやすくなったと考えられる。

6. 結論

水圧破碎法における亀裂の進展に、既存亀裂の走向と破碎流体の粘性が与える影響について調べるために、個別要素法を用いた数値シミュレーションを行った。その結果、粘性に関わらず既存亀裂と水圧破碎亀裂の交差角が小さいとき、既存亀裂からの影響を受け、進展方向が最大主応力方向からずれてしまうことがわかつ

た。また、低粘性流体を用いた水圧破碎では既存亀裂で進展が止まる場合がある。こうした亀裂でも、高粘性流体を用いることで破碎を進展させることができる場

合があることが示された。水圧破碎法を用いる場合、既存亀裂の走向や破碎流体の粘性が破碎の進展に影響することが明らかとなった。

参考文献

- 1) Hubbert, M.K., and Willis, D.G. : Mechanics of Hydraulic Fracturing, *Transactions of Society of Petroleum Engineers of AIME*, Vol. 210, pp. 153-168, 1957
- 2) 近藤浩文 : 高温岩体発電のための水圧破碎面の予測手法の開発—既存割れ目の性状について—, 電力中央研究所報告・研究報告 : U93039, 1994
- 3) Zhou, J., Chen, M., Jin, Y. and Zhang, G. : Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 45, no. 7, 1143-1152, 2008
- 4) Renshaw, M.M., Aghighi, A., Shik, A.R., Syed, A.H. : Effect of Natural Fracture on Hydraulic Fracture Propagation in Naturally Fractured Porolastic Reservoir, *SPE 121903, EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition*, 2010
- 5) Zhao, X., and Young, R.P. : Numerical modeling of seismicity induced by fluid injection in naturally fractured reservoirs: *GEOPHYSICS*. VOL. 76, NO. 6; P. WC167-WC180, 18 FIGS., 3 TABLES, 2011
- 6) 海江田秀志, 佐々木俊二, 本島勲, 澤田義博, 日比野敏, 堀義直 : 高温岩体発電のための岩盤破碎技術 (その1) ケーシングリーマー・サンドブラグ方式水圧破碎法の開発, 電力中央研究所・研究報告:U88026, 1988
- 7) Shimizu, H., Murata, S., and Ishida, T. : The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48, 712-727, 2011
- 8) Potyondy, D.O., and Cundall, P.A. : A bonded-particle model for rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41 1329-1364, 2004
- 9) Potyondy, D.O. : Parallel-bond refinements to match macroproperties of hard rock, *Proceedings of the second international FLAC/DEM symposium*, pp. 459 - 465, 2011
- 10) Thallak, S., Rothenburg, L., and Dusseault, M. : Simulation of multiple hydraulic fractures in a discrete element system, *Proceedings of the 32nd US rock mechanics symposium*, pp.271-280, 1991
- 11) Kulatilake, P.H.S.W., Malama, B., and Wang, J. : Physical and particle flow modeling of jointed rock block behavior under uniaxial loading, *Int J Rock Mech Min Sci*, pp. 641-657, 2001
- 12) Ivars, M.D., Potyondy, D.O., Pierce, M., and Cundall, P.A. : The smooth-joint contact model, *Proceedings of the 8th world congress on computational mechanics, 5th European congress on computational mechanics and applied science and engineering, Venice*, 2008
- 13) Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., and Zimmerman, R.W. : Fundamentals of rock mechanics, *Oxford, Blackwall*, 2007

INFLUENCE OF PRE-EXISTING FRACTURE AND FLUID VISCOSITY ON HYDRAULIC FRACTURING

Masaya NAGASO, Hitoshi MIKADA, Junichi TAKEKAWA, and Tada-nori GOTO

For the estimation of the propagation of hydraulic fracture, fluid viscosity and pre-existing fracture should be taken into consideration. In order to investigate the influence of them on the behavior of hydraulic fracture, we perform a serie of numerical simulations using 2D DEM code. In our study, low and high viscous fluids are used as fracturing medium with a single pre-existing fracture placed with three different strike angles. The results show that the propagation of hydrulic fracuter is strongly influenced by pre-existing fracture in the case of low strike angle. The results also show that high viscous fluid could extend the fracturing beyond the pre-existing fracture antithetically to low viscous fluid.