

(95) 不連続性岩盤内水圧破碎における亀裂進展解析

情報数理研究所	正会員○	中井仁彦
埼玉大学工学部	正会員	浜島良吉
三井建設	正会員	鈴木隆次

The Analysis of Crack Development with the Hydraulic Fracturing in High Temperature Discontinuous Rock - Mass

Yoshihiko Nakai	Info. and Math. Sci. Lab, Inc
Ryokichi Hmajima	Saitama University
Takatsugu Suzuki	Mitui Construction Co. Ltd

ABSTRACT

In rock masses, discontinuities of faults, joints, etc. exist and exert large influences on the heat transfer and the fluid flow and the mechanical property. In the coupled problems of heat transfer, seepage flow and stress in discontinuous rock masses in this study, analysis was made on the stress balance using the modified virtual displacement method and on the mass conservation and energy conservation laws using the integrated finite difference method. This analytic method makes possible the analysis considering the hydraulic openings of crack. This paper describes the simulation result of the hydraulic fracturing in rock mass.

1. はじめに

地下深部の、石油ガス、熱水などは、岩盤中に多数存在する不連続面を通して、地上へ採取される。この不連続面を人為的に活性化させたり、人工的に作成する技術が研究開発されつつある。水圧破碎は、その中でもっとも有力なものであり、地熱発電、石油資源開発においてさかんに研究、開発がなされている。

本研究では、多数の亀裂を有する岩盤内での熱、浸透、応力の連成現象が評価できる解析手法の開発を目標としており、ここでは岩盤内での水圧破碎、既存亀裂を考慮した水圧破碎解析を行ない、プログラムの実用性を検討する。

2. 基礎方程式

岩盤内における流体の浸透、熱の移動、応力の釣り合いは、質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則（熱力学第1法則）により支配される。

流体の質量保存則を体積を V 、表面積 S の領域について積分形式で表すと次式となる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \int_S J_n^{[M]} dS + \int_V q dV \quad (1)$$

M : 体積 V 内の全質量

q : ソース項

$J^{[M]}$: 法線方向の質量流束密度

固体に関する質量保存則は、岩粒子が移動しないものとして、考えない。

運動量保存則に関しては、流体の流れは遅いので、ダルシー則を用いて簡略化する。

$$v = \frac{k}{\mu} \nabla P \quad (2)$$

v : ダルシー速度

P : 流体圧力

k : 浸透率

μ : 粘性係数

固体の運動方程式に関しては時間変化を考慮しないものとして、応力の釣り合い式を解くことにする。

$$\underbrace{M\ddot{X}}_{\text{慣性項}} + \underbrace{C\dot{X}}_{\text{減衰項}} + \underbrace{KX + f}_{\text{釣り合い式}} = 0 \quad (3)$$

エネルギー保存則に関しては、流体と固体は短時間に熱的、圧力的に平衡に達するものとして流体、固体を同時に解くものとする次式となる。

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \int_S J_n^{[H]} dS + \int_S J_n^{[Q]} dS + \int_V q h dV \quad (4)$$

E : 体積 V 内の全エネルギー量

h : エンタルピー

$J_n^{[H]}$: 流体の流れによるエンタルピー流束密度

$J_n^{[Q]}$: 流体、固体の熱伝導による熱流束密度

質量保存則、エネルギー保存則については、積分差分法 (Integrated Finite Difference Method) を用いて定式化を行なった。この手法によると領域の形状は任意になり、図 1 に示すような、ごく平たい形状から立体的な形状まで扱えるようになり、亀裂を含む岩盤の取り扱いが容易になる。また、応力の釣り合い式については修正仮想変位法 (Principle of Modified Virtual Displacement) により定式化を行った。この方法は任意形状が扱えるのが特徴的であり積分差分法とは相性がよいと考えられた。

亀裂要素については、内部は流体だけが存在するものとし、流体圧と岩盤の有効応力が亀裂面において釣り合うものとした。(図 2) 亀裂の体積 ΔV は次式とした。

$$\Delta V = \Delta S \times \delta \quad (5)$$

ΔS : 亀裂面積

δ : 亀裂の厚さ

岩盤の浸透率、亀裂の浸透率は、岩盤内の空隙率、亀裂の厚さの変化により変動するものとした。

これらの関係式を解くことにより、熱、浸透、応力の連成解析が可能になる。

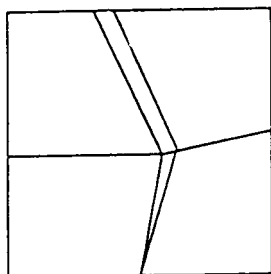


図 1 亀裂を考慮したブロック分割図

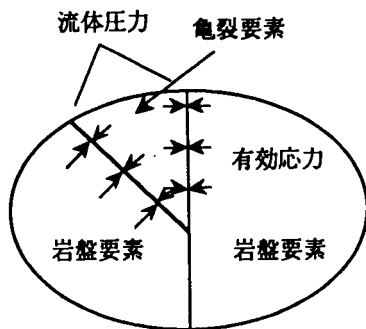


図 2. 亀裂面での応力の釣り合い図

3. 岩盤内での水圧破砕

応力の釣り合い式を修正仮想変位法により、また質量、エネルギー保存則を、積分差分法により定式化したプログラムを作成した。定式化については中井ら (1994) の報告を参照のこと。

以下にそのプログラムを用いて行なった解析を示す。

3. 1 解析条件

図 3 に示すような上下 100m、左右 100m、厚さ 10m の領域に対し、ポロノイ分割を行ない、これを解析領域とした。岩盤内には多数の亀裂が存在し、その亀裂により岩体は様々な形状に細分化され、または微細な亀裂が大きな亀裂につながり分割されつつある。ポロノイ分割を用いたのは、これによって様々な形状のブロックができ、岩盤の形状に良く似ると考えたからである。

解析に用いた主な岩石の物性値は表 1 に示す通りであり、破壊の評価は要素間の相対変位により判定した。破壊力学的な評価を行なうべきであるが、亀裂の形状が複雑で適用できない場合が多いので、もっとも簡単な引張り破壊による判定方法を用いた。

深部の岩圧の高い領域を考えているので、力学的な拘束条件としては、上下面を鉛直方向に固定、左右面を左右方向に固定した。ヤング率は岩盤内の亀裂により岩石試験の値より小さくなると考え、また上下面、左右面を固定していることと考え合わせて小さな値を設定した。初期応力は力学的に釣り合っているとして、全てゼロとした。流体の初期応力、初期温度は、全てのブロックにおいてそれぞれ100 bars、200℃とした。

注水条件としてはあらかじめ亀裂を設定しておき、そこに100℃の流体を流し込み、亀裂の進展を起こさせた。注水量は2.5時間までは1秒当たり1kgとし、それ以降は1秒当たり2kgとした。

3.2 解析結果

注水亀裂の流体圧力、流体温度、亀裂の厚さの時間変化を図4に示した。圧力が上昇し亀裂が進展すると圧力は急降下する。これはつながった亀裂の体積が増えたために、質量保存の法則を満たすには流体密度が小さくなる必要があり、圧力が急激に低下したのである。この時には亀裂内に亀裂面に対し垂直方向に収縮の力が働き、亀裂の厚さは小さくなる。また、この現象は体積が瞬時に大きくなる断熱膨張であるので温度も低下している。

亀裂進展が進むにしたがって、注水量が一定なので圧力の上昇は緩やかになる。また、要素境界面の方向、面積により亀裂を広げようとする力の掛かりかたが異なるので、圧力のピークに凹凸ができる。

図5に亀裂進展の最終形状を示した。亀裂の進展方向は亀裂のつながりに対し、もっとも角度の小さい方向の亀裂に進んでおりほぼ水平に分布している。

以上の結果は亀裂の進展時における現象を矛盾なく表している。実際のフィールドの物理特性を設定し、解析を繰り返せば水圧破碎の予測、評価が的確にできるようになると考える。

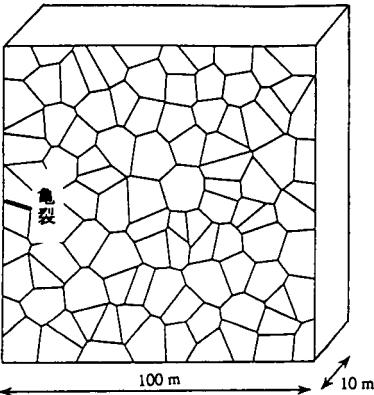


図3 水圧破碎モデルの概念図

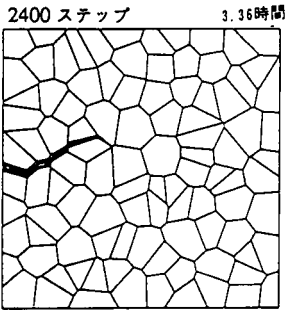
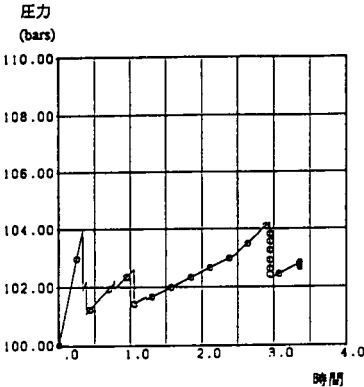


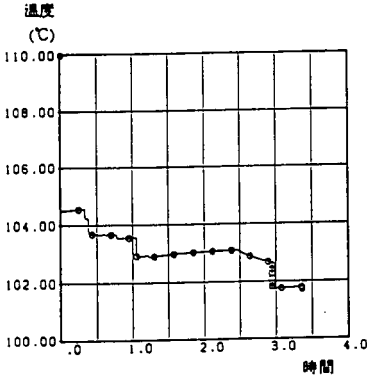
図5 亀裂の最終形状

表1 解析モデルの特性値

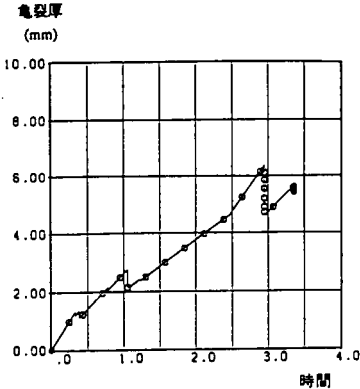
岩体孔隙率	0.1	(-)
岩体浸透率	10^{-18}	(m^2)
ヤング率	3000	(kgf/cm^2)
ポアソン比	0.333	(-)
引っ張り強度	5.0	(kgf/cm^2)



a. 圧力の時間変化



b. 温度の時間変化



c. 亀裂の厚さの時間変化

図4 亀裂進展時の時間変化図

4. 既存亀裂を考慮した水圧破砕解析

館野（1993）らによる実験結果からわかるように、実際の水圧破砕では、図6に示すような圧力変化を示すことが知られている。このようにピーク圧力が上昇傾向を示すのは、亀裂が多数存在し、様々な方向に亀裂が進展する場合である。亀裂が進展しても実効的な亀裂半径が大きくなり、応力拡大係数が小さなままになりピーク圧力が大きくなってしまいう現象である。このような現象の再現をするために以下の解析を行なった。

4.1 解析条件

図7に示すように縦3000m、横3000m、厚さ100mの領域を解析領域とし、ポロノイ分割により領域分割を行なった。自重を考慮し、上面に10 kgf/cm²の荷重を加え、また力学的な拘束条件として底面、側面を固定した。流体の初期圧力、初期温度は、上面にて、5 bars、100℃とし、1m当りに0.09 bars、0.08℃の勾配をもたせた値を設定した。底面、側面は閉境界であり、上面だけが開境界とした。物性値および破壊の測定方法は、前解析と同じである。

4.2 解析結果

亀裂に注水を行なう場合、亀裂内は浸透性が高くほぼ同じ圧力になるので、つながった亀裂の面に一定の圧力を加えるという近似を用いて破壊解析を行なった。最初に亀裂の無い岩盤での解析を行ない、その後、縦方向の既存亀裂の卓越した領域の解析を行なった。モデル1では500m四方の領域に一ヶの既存亀裂を、即ち計36ヶの既存亀裂を設定した。モデル2では250m四方の領域に一個の既存亀裂を、即ち計144個の既存亀裂を設定した。図8は亀裂のないモデル、モデル1、モデル2の亀裂最終形状である。亀裂のないモデルではほぼ水平方向に亀裂の進展がみられ、モデル1では亀裂のない場合との差はあまり認められない。モデル2では上下に亀裂が発達しており、無いモデルと全く異なる分布を示している。既存亀裂が応力の掛かり方を変え、進展方向を変えたものとする。

図9には、亀裂進展を起こしたとき流体のピーク圧力と、亀裂が進展するステップとの相関関係を示した。亀裂の無いモデルではピーク圧力が徐々に低下している。小さな上下は境界面の方向により、応力の掛かり方が異なり、破壊の起きる流体圧力が異なってくるために生じている。モデル1は初めの16ステップまでは亀裂の無いモデルと同じであり、その後、既存亀裂につながり、圧力のピークが変化している。モデル2では6回目のステップに既存亀裂にあたっており、その後も40ステップの間に数回、既存亀裂につながっている。圧力の変化は1から10ステップをながめれば、あとに高いピークが出ており、図9が時間スケールであることを考え合わせれば近い特性といえる。同様に10から40ステップをながめれば、ピークが繰り返して出ており、実際のフィールドの特性に近いものが再現できたことになる。ここではポロノイ分割により岩盤を表しているが、測定による亀裂の走行頻度等を考慮したブロック分割を行なえば、より実際に近い特性が再現できるものとする。

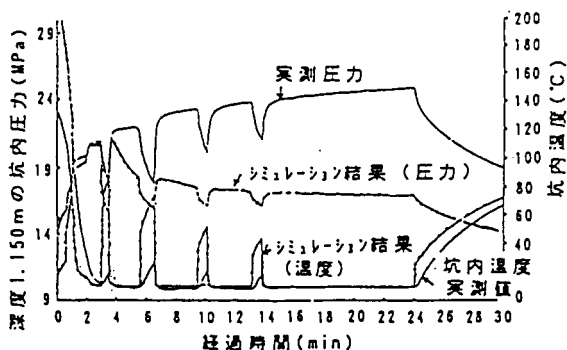


図6 水圧破砕時の測定結果

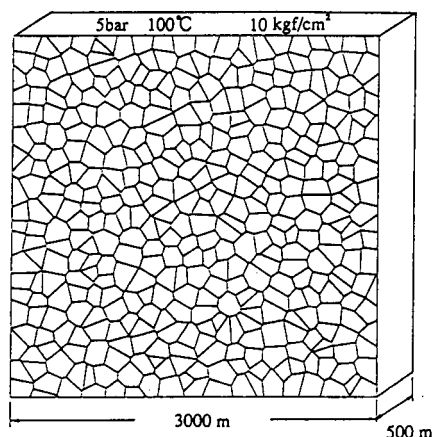


図7 広域水圧破砕の概念概念モデル

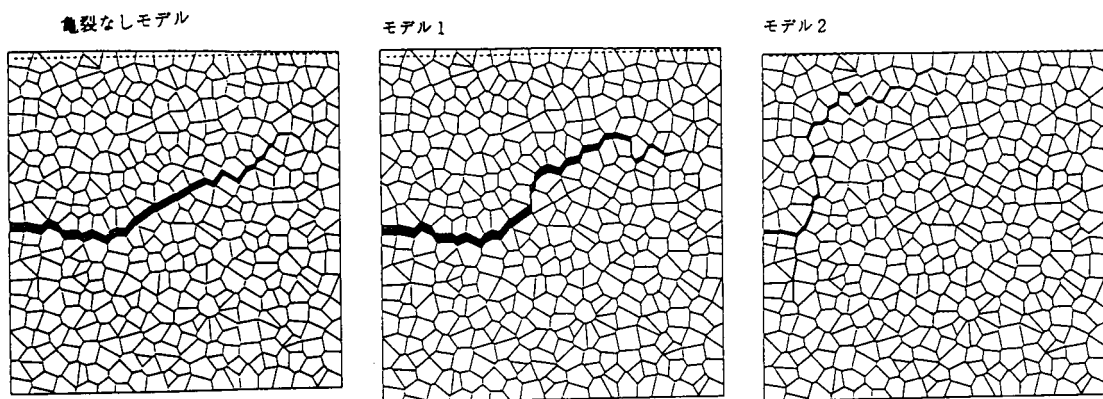


図8 亀裂の有無による亀裂形状の比較

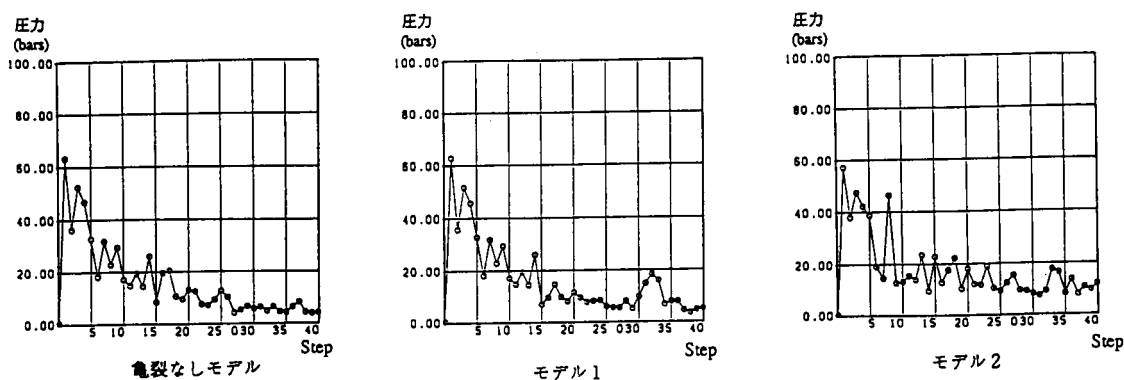


図9 亀裂の有無による破砕水圧の違い

5. まとめ

既存亀裂の無い場合の解析、及び亀裂のある場合の解析を行い、それぞれ実際の現象を良く説明できる結果が得られた。このことは水圧破砕のような亀裂内の熱、浸透、応力の連成した現象の評価を行なう場合の、物理パラメーターの感度解析、最適条件の検討が本シミュレータにより可能であることを意味している。修正仮想変位法による応力の釣り合い式の定式化、及び質量、エネルギー保存則の積分差分法による定式化は、熱、浸透、応力の連成した現象の解析に適した方法であったことが証明できたことになる。

参考文献

- 中井仁彦、浜島良吉（1994）：不連続性岩盤における応力、水、熱の連成解析の定式化（応力解析）、日本地熱学会誌、Vol.16, No.4, pp.1-34.
- 館野正之、中井仁彦（1993）：可採量増大技術の開発 フラクチュア挙動シミュレータの開発と現場実験結果への適用、日本地熱学会平成5年度学術講演会、B25